

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

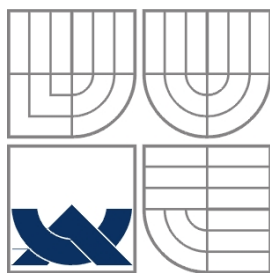
TRANSFORMÁTOROVÁ PÁJEČKA 500W

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

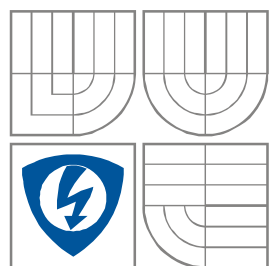
Bc. JAN ŠELEPA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TRANSFORMÁTOROVÁ PÁJEČKA 500W

POWER SOLDERING STATION 500W

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

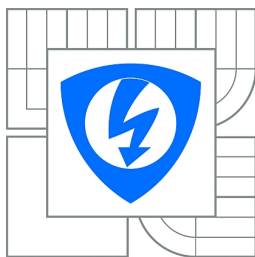
Bc. JAN ŠELEPA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Šelep

ID: 78320

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Transformátorová páječka 500W

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Oživte celé zařízení s deskami plošných spojů realizovanými v SP2.
2. Vypracujte výrobní dokumentaci k elektrické i mechanické části celého zařízení (schémata, rozpisky součástek, osazovací plány DPS, navíjecí předpisy, výkresy event. náčrtky mechanických dílů).
3. Provedte měření na hotovém zařízení (oteplovací test, funkčnost, účinnost měniče, průběhy důležitých veličin v silovém obvodu měniče).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce obsahuje kompletní návrh a popis realizace transformátorové páječky 500W. Páječka obsahuje jednočinný DC/DC měnič s impulzním transformátorem. Celé zařízení pracuje s velmi malým výstupním napětím a extrémně velkým proudem. Z toho důvodu mají některé části speciální provedení, aby byla zaručena správná funkce zařízení. Neobvyklé je koaxiální provedení transformátoru s velmi malou rozptylovou indukčností (jednotky nH). Dalším speciálním prvkem je synchronní usměrňovač usměrňující malé napětí a velký proud na výstupu transformátoru. Hotový funkční prototyp se skládá z pájecí stanice a k ní připojeného pájecího adaptéru.

Abstract

This thesis contains a complete description of the design and implementation of a 500W transformer soldering station. This soldering station includes a half-bridge DC/DC converter with a pulse transformer. The device works with a very low voltage and extremely high output current. Therefore some parts have a special design to ensure the proper equipment function. Coaxial transformer with very low leakage inductance (nH units) is unusual. A synchronous rectifier is another special feature working with low voltage and high output current of the transformer. The finished functional prototype consists of a soldering station and a soldering adapter.

Klíčová slova

DC/DC měnič; jednočinný můstkový propustný měnič; řídicí obvody; budicí obvody; návrh pulsního transformátoru; minimalizace rozptylu transformátoru, synchronní usměrňovač; UC3845; pájecí stanice; pájecí adaptér

Keywords

DC/DC converter; half-bridge DC/DC converter; driver circuits, control circuits, pulse transformer design; minimization of the transformer leakage; synchronous rectifier, UC3845; soldering station; solder adapter

Bibliografická citace

Bibliografická citace – Šelep, J. Transformátorová páječka 500W, Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 55 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Transformátorová páječka 500W jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

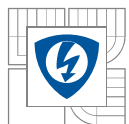
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlovi Vorlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

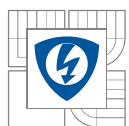
V Brně dne

Podpis autora



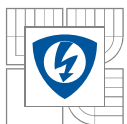
OBSAH

1 ÚVOD	13
2 POPIS POUŽITÉHO DC/DC MĚNIČE	14
3 PARAMETRY MĚNIČE PRO ÚČELY PÁJEČKY	17
3.1 TRANSFORMÁTOROVÁ PÁJEČKA 100W	17
3.2 PŘEPOČET PARAMETRŮ PRO PÁJEČKU 500W	18
4 ZAPOJENÍ SILOVÉHO OBVODU	19
5 IMPULSNÍ TRANSFORMÁTOR MĚNIČE	21
5.1 NÁVRH TRANSFORMÁTORU	21
5.2 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	24
6 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ SILOVÉHO OBVODU	26
7 ŘÍDICÍ OBVODY	29
7.1 POPIS ZAPOJENÍ ŘÍDICÍCH OBVODŮ	29
7.2 REGULACE VÝSTUPNÍHO PROUDU A NADPROUDOVÁ OCHRANA	31
7.3 NÁVRH TRANSFORMÁTORKU PRO MĚŘENÍ PROUDU	32
7.4 NÁVRH BUDICÍHO TRANSFORMÁTORKU	33
8 REALIZACE PŘÍSTROJE	34
8.1 CELKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ	34
8.2 ROZPISKA SOUČÁSTEK VE SCHÉMATU	35
8.3 SOUPIS SOUČÁSTEK	36
8.4 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	38
8.5 PÁJECÍ STANICE	43
8.6 PÁJECÍ ADAPTÉR	48
9 KONTROLNÍ MĚŘENÍ	49
10 ZÁVĚR	54
LITERATURA	55



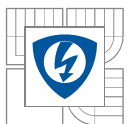
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Jednočinný můstkový propustný měnič - schéma zapojení</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 Jednočinný můstkový propustný měnič – průběhy veličin (indukčnost $L \rightarrow \infty$)</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3 Schéma zapojení silové části měniče</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 4 Topologie usměrňovače</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5 Náhradní schéma sekundární části měniče.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6 Řez transformátorem.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 7 Skutečné rozměry transformátoru.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 8 Schéma řídicích obvodů.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 9 Blokové schéma integrovaného obvodu UC3845[6]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 10 Schéma zapojení primární strany silového obvodu a řídicích obvodů (deska plošných spojů)</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 11 Deska plošných spojů.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 12 Osazovací plán ze strany spojů – SMD součástky</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 13 Osazovací plán ze strany součástek.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 14 Vyrobená a osazená deska</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 15 Přístrojová krabice typ U-KK12-231.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 16 Rozmístění vytvořených otvorů v krabici</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 17 Popis vývodů na předním panelu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 18 Rozmístění jednotlivých komponent.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 19 Jiný pohled na rozmístění komponent.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 20 Pájecí adaptér.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 21 Napětí u_{GE} primárních tranzistorů ($U_D=350V$, bez zátěže měniče).....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 22 Napětí u_{CE} na tranzistoru T_2 bez zátěže</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 23 Detail náběžné hrany při vypínání tranzistoru T_2 (měnič bez zátěže)</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 24 Napětí u_{GE} na tranzistorech T_{D0} a T_{D1} synchronního usměrňovače</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 25 Napětí u_{GE} na tranzistorech T_2 a T_{D1}</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 26 Napětí u_{CE} na tranzistorech T_{D0}.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 27 Napětí u_{CE} (u_X) na tranzistorech T_{D0} při zatížení 450A.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 28 Porovnání detailů výstupního napětí u_{CE} a) naprázdno, b) se zátěží.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 29 Hotový prototyp</i>	<i>54</i>



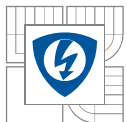
SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozpiska součástek.....	35
Tab. 2 a) Soupis součástek.....	36
Tab. 2 b) Soupis součástek.....	37
Tab. 3 Navíjecí předpisy transformátorků.....	37

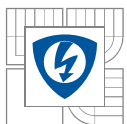


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

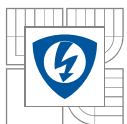
Symbol	Veličina	Jednotka
A_L	Součinitel indukčnosti	nH.zav ⁻²
B_{max}	Maximální magnetická indukce	T
C	Kapacita	F
$D,(U\$)$	Dioda	-
f	Frekvence	Hz
$i(t)$	Časově proměnný proud	A
I_{1ef}	Efektivní hodnota proudu primárním vinutím	A
I_2	Efektivní hodnota proudu sekundárním vinutím	A
I_{2AV}, I_{FAV}	Střední hodnota proudu diodou	A
I_{2max}	Maximální hodnota proudu sekundárním vinutím	A
I_{Cef}	Efektivní hodnota kolektorový proudu prim. tranzistorem	A
I_{Cmax}	Maximální hodnota proudu primárním tranzistorem	A
I_D	Proud vstupním usměrňovačem	A
I_{Dmax}	Maximální hodnota proudu vstupním usměrňovačem	A
I_{demag}	Demagnetizační proud	A
I_F	Střední hodnota proudu každou diodou v můstku	A
$I_{\mu max}$	Magnetizační proud impulzního transformátoru	A
J	Proudová hustota	A.mm ⁻²
K	Součin primárních a sekundárních závitů	-
l	Délka pájecího oka	mm
L	Indukčnost	H
L_{R2}	Rozptylová indukčnost	H
n	Počet vodičů ve svazku „vf lana“	-
N_1	Počet primárních závitů	závit
N_2	Počet sekundárních závitů	závit
N_D	Počet závitů demagnetizačního vinutí	závit
P	Výkon	W
P_2	Výstupní výkon zařízení	W
P_{diody}	Ztrátový výkon na diodě D11	W
$P_{př}$	Přepínací ztráty na tranzistoru	W
P_{ved}	Ztráty vedením na tranzistoru	W



R	Odpor	Ω
R_{DSON}	Odpor tranzistoru v sepnutém stavu	Ω
s	Střída	- ; %
S_{Fe}	Průřez magnetického obvodu jádra	m^2
T	Tranzistor	-
TR	Transformátor	-
t_1, t_{zap}	Doba, po kterou jsou tranzistory zapnuté	s
t_2	Doba, po kterou jsou tranzistory vypnuté	s
t_{demag}	Doba demagnetizace jádra	s
t_{on}	Zapínací doba tranzistoru	s
t_{off}	Vypínací doba tranzistoru	s
U_1	Vstupní napětí	V
U_2	Napětí na sekundárním vinutí transformátoru	V
U_{2max}	Maximální hodnota napětí na sek. vinutí transformátoru	V
u_{BE}, u_{GE}	Napětí na přechodu gate-emitor v tranzistoru	V
U_{CC}	Napájecí napětí řídicích obvodů	V
u_{CE}	Napětí na přechodu kolektor-emitor v tranzistoru	V
U_{CEmax}	Max. hodnota napětí na přechodu kolektor-emitor v tran.	V
U_D	Střední hodnota usměrněného síťového napětí	V
U_R	Napětí v závěrném směru diody	V
u_X	Napětí na nulové diodě na sekundární straně	V
$U_{Xstř}$	Střední hodnota napětí na nulové diodě na sekundární straně	V
Δt	Časová změna	s
$\Delta U_{TD0,1}$	Úbytek napětí na tranzistorech $T_{D0,1}$	V
α	Teplotní koeficient odporu mědi	-
δ	Hloubka vniku skin efektu	m
Φ	Magnetický tok	Wb
Φ_μ	Magnetizační tok jádra transformátoru	Wb
A	Magnetická vodivost toroidního jádra	H
ρ	Rezistivita	$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$
\varnothing	Průměr drátu	mm



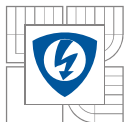
Zkratka	Význam
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
EMC	Electromagnetic compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
GND	Ground (zem)
LED	Light-emitting diode (svítivá dioda)
MOS-FET	Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor (polem řízený tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
SMD	Surface Mounted Devices (součástky určené pro povrchovou montáž)



1 ÚVOD

Tato diplomová práce pojednává o problematice návrhu a realizace páječky s velkým výkonem. V běžné praxi jsou páječky podobných výkonů vyrobeny pomocí topné spirály, která ohřívá měděné pájecí těleso – hrot. Takové řešení je poměrně jednoduché, zabezpečuje dobrý odvod tepla do pájeného spoje. Má však řadu nevýhod: velká doba ohřevu (značná tepelná kapacita), obvykle absence možnosti regulace výkonu, velké rozměry styčné pájecí plošky nástroje. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k řešení páječky za pomoci DC/DC měniče s transformátorem. Použití transformátoru o síťovém kmitočtu 50Hz není vhodné z důvodu jeho značné velikosti a hmotnosti. V měniči je transformátor menší, jeho pracovní frekvence se pohybuje v řádu desítek kHz. Jedná se o zdroj velkého proudu a malého napětí. Tato konfigurace není zcela běžná pro tento typ měniče, proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost návrhu transformátoru – ten musí být proveden speciální konstrukcí s minimálním rozptylem. Dalším úskalím je usměrnění poměrně nízkého napětí s co nejmenší ztrátou. To je vyřešeno použitím synchronního usměrňovače.

Celkové zařízení se skládá ze zdroje – pájecí stanice, a k němu připojeného externího zařízení – pájecího adaptéru. Možnosti využití jsou k pájení větších objemů, v případech kdy je výkon běžné transformátorové páječky nedostatečný - spojování kabelů větších průřezů, pájení plechů. Výkon zdroje je plynule regulovatelný nastavením proudu. Doba ohřevu pájecího očka je velmi krátká – téměř okamžitě páječka funguje na plný výkon, který je koncentrován do malé pájecí plošky na konci očka.



2 POPIS POUŽITÉHO DC/DC MĚNIČE

Volba typu DC/DC měniče

Pro účely transformátorové páječky zadaného výkonu byl zvolen jednočinný můstkový propustný měnič (schéma zapojení viz obr. 1). Má pro tento účel asi nejvýhodnější vlastnosti a je vhodný pro větší výkony.

Poznámky k činnosti měniče v režimu spjitých proudů:

Měnič nemusí obsahovat vinutí pro demagnetizaci, ta proběhne v době po vypnutí tranzistorů, když se magnetizační proud uzavře přes demagnetizační diody D_{demag} . Tím se primární vinutí transformátoru připojí automaticky na záporné napětí U_1 , jehož polarita je opačná než tomu bylo v době t_1 , když byly tranzistory sepnuty. Po vypnutí tranzistorů také přestane protékat transformovaná část proudu primárním vinutím $I_{\text{výst}}N_2/N_1$, neboť přestává protékat proud sekundárním vinutím $I_{\text{výst}}$. Tranzistory spolu s diodami D_{demag} vykonávají práci *horního a dolního spínače magnetizačního proudu*. Tranzistory spolu s diodou D_0 zapojenou až na sekundární straně měniče tvoří horní spínač pro transformovaný (užitečný) proud měniče. Měnič musí mít zátěž induktivního charakteru, kterou pro tento horní spínač zajistí tlumivka L zapojená na výstupu. Zároveň však nesmí na sekundární straně měniče být dvojecestný můstkový usměrňovač, ale výhradně jednocestný. V jiném případě by nefungoval systém demagnetizace.

Pro jednočinný můstkový propustný měnič musí platit:

$$U_1 t_1 = U_1 t_{\text{demag}} \quad (2.1)$$

Z toho vyplývá, že platí:

$$t_{\text{demag}} = t_1 \quad (2.2)$$

Doba vypnutí t_2 musí být pro zajištění dokončení demagnetizace větší nebo rovna t_{demag} . Odsud je patrné, že velikost střídý musí být:

$$s \leq 0,5 \quad (2.3)$$

Špičková hodnota $I_{\mu \max}$ bude největší při $t_{1\max} = T/2$, což nastane právě při $s_{\max} = 0,5$. Pak platí:

$$I_{\mu \max} = \frac{U_1}{2L_1} \quad (2.4)$$

Určení počtu primárních závitů:

$$N_1 = \frac{U_1 T}{2B_{\max} S} \quad (2.5)$$

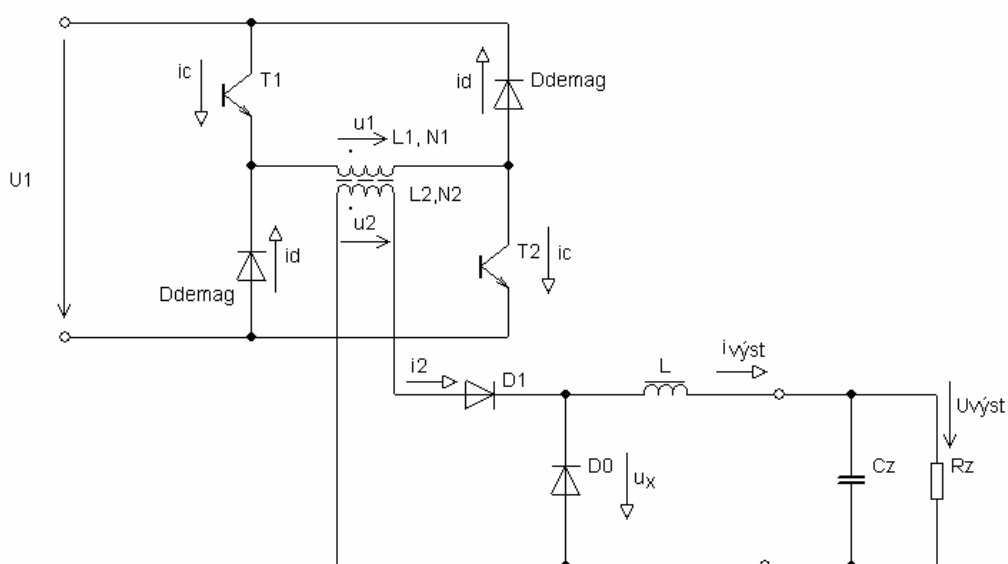
Maximální dosažitelné výstupní napětí měniče vzhledem k $s_{\max} = 0,5$ bude:

$$U_{2\max} = \frac{1}{2} U_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (2.6)$$

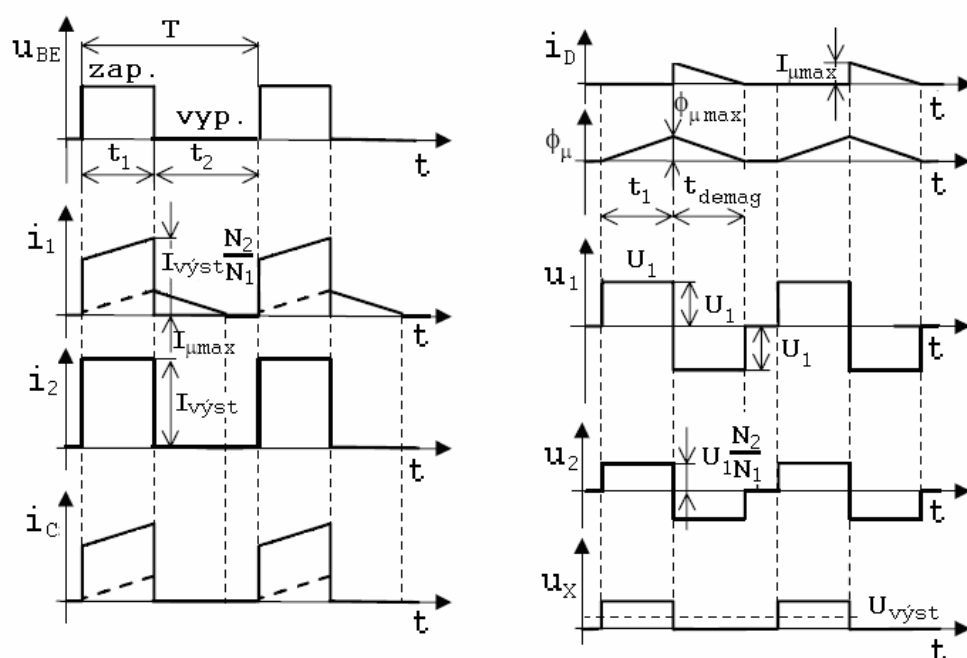
Vlastnosti měniče:

Výhody: Použitý měnič je použitelný i pro velké výkony, protože v něm nevznikají tak výrazné nežádoucí napěťové špičky během vypínání tranzistorů, jak tomu bývá u měniče obsahující demagnetizační vinutí. U měniče s demagnetizačním vinutím se totiž uplatňuje parazitní rozptylová indukčnost vyskytující se mezi primárním a demagnetizačním vinutím. Tranzistor můstkového měniče je navíc po vypnutí v ideálním případě namáhán pouze napětím o velikosti U_1 , zatímco u měniče s demagnetizačním vinutím se jedná o napětí o velikosti $U_1 + U_1 N_1 / N_D$ (N_D je počet závitů demagnetizačního vinutí).

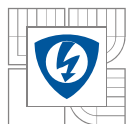
Nevýhody: Měnič obsahuje dvojici tranzistorů, která je z pohledu ztrát v sériovém zapojení. Z tohoto důvodu jsou ztráty vedením dvojnásobně vyšší než u měniče s demagnetizačním vinutím. Pro správnou funkci měniče je zapotřebí generovat dva shodné budicí signály pro každý z tranzistorů, které jsou od sebe zároveň galvanicky oddělené. Tento požadavek je v našem případě řešen pomocí impulsního transformátoru, avšak z toho důvodu jsou složitější řídicí obvody.



Obr. 1 Jednočinný můstkový propustný měnič - schéma zapojení



Obr. 2 Jednočinný můstkový propustný měnič – průběhy veličin (indukčnost $L \rightarrow \infty$)



3 PARAMETRY MĚNIČE PRO ÚČELY PÁJEČKY

Pro zjištění napětí a proudu pájecího oka, které má mít navrhovaná páječka o výkonu 500W, bylo jako výchozí nejprve provedeno orientační měření na standardní transformátorové páječce o výkonu 100W. Následně se tyto parametry navýšily v poměru vhodném pro zadaný výkon.

3.1 Transformátorová páječka 100W

Změřený úbytek napětí U_1 na očku páječky 100W:

$$U_1 = 0,31V$$

Dále byl proveden výpočet přibližné hodnoty odporu oka při očekávané maximální teplotě 450° C. Rezistivita mědi oka při teplotě 450°C:

$$\rho_{450} = \rho_{20}(1 + \alpha\Delta t) = 0,0178(1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 430) = 0,048 \frac{\Omega mm^2}{m} \quad (3.1)$$

kde:

$$\Delta t = 450^\circ - 20^\circ = 430^\circ - \text{rozdíl teplot } 450^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

$$\rho_{20} = 0,0178 \Omega mm^2/m - \text{rezistivita mědi pro } 20^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 4 \cdot 10^{-3} K^{-1} - \text{teplotní koeficient odporu mědi}$$

Rozměry oka standardní transformátorové páječky jsou přibližně:

$$\text{délka drátu } l = 6\text{cm}$$

$$\text{průřez drátu } S = 1,5\text{mm}^2$$

Tedy odpor oka při 450°C bude:

$$R = \rho_{450} \frac{l}{S} = 0,048 \frac{6 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 1,92 m\Omega \quad (3.3)$$

Z naměřeného napětí a vypočítaného odporu byl vypočítán proud, který protéká okem

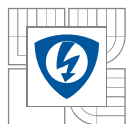
$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,31}{1,87 \cdot 10^{-3}} = 166 A \quad (3.4)$$

Skutečný výkon na očku stowattové páječky tedy je:

$$P = U \cdot I = 0,31 \cdot 166 = 51,46 W \quad (3.5)$$

Proudová hustota J v drátu oka:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{166}{1,5} = 111 A \cdot mm^{-2} \quad (3.6)$$



3.2 Přepočet parametrů pro páječku 500W

Pokud bychom při velkém výkonu 500W chtěli realizovat očko opět z měděného drátu (s malou rezistivitou), museli bychom vyrobit větší očko, ovšem při zachování poměru délky a průřezu. Očko nesmí být příliš dlouhé a tenké, aby byl zajištěn dostatečný odvod tepla z celého očka do pájeného spoje. Nesmí však být ani příliš krátké, protože by díky příliš malému odporu musel být použit pro dosažení patřičného výkonu zdroj s velmi vysokým proudem a malým napětím - s následnými problémy ztrát na přívodech, přechodových odporech atd.

Při snaze o zachování proporcí délka/průřez tedy realizujeme očko se stále stejným odporem. Při výkonu $P_2 = 500\text{W}$ tomu odpovídá potřebný proud:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{R}} = \sqrt{\frac{500}{1,92 \cdot 10^{-3}}} = 510\text{A} \quad (3.7)$$

A napětí na očku bude:

$$U_2 = \frac{P_2}{I_2} = \frac{500}{510} = 0,98\text{V} \quad (3.8)$$

Vzhledem k očekávanému zvýšení průřezu očka, snížíme poněkud pracovní proudovou hustotu:

$$J_2 = 0,8 \cdot J = 0,8 \cdot 111 = 88,8\text{A/mm}^2 \quad (3.9)$$

Pomocí proudové hustoty a proudu spočteme potřebný průřez drátu očka S_2

$$S_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{510}{88,8} = 5,74\text{mm}^2 \quad (3.10)$$

Tomu odpovídá průměr drátu:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{S_2}{\pi}} \cdot 2 = \sqrt{\frac{5,74}{\pi}} \cdot 2 = 2,7\text{ mm} \quad (3.11)$$

Pro zachování proporcí (tj. odporu) bude délka nového očka:

$$l_2 = l \frac{S_2}{S} = 6\text{cm} \frac{5,74\text{mm}^2}{1,5\text{mm}^2} = 23\text{cm} \quad (3.12)$$

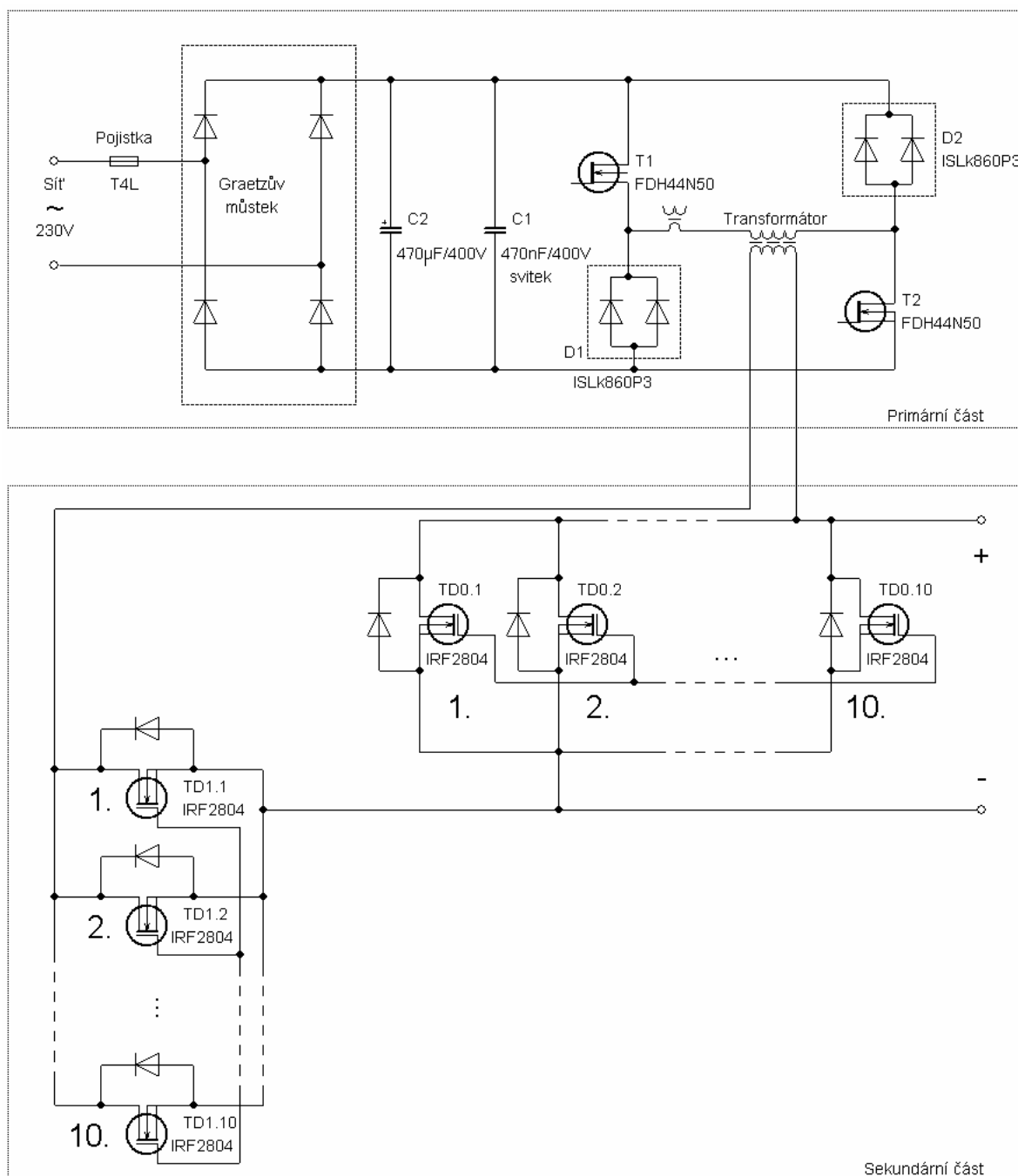
Při praktických pokusech s takto velkým měděným očkem bylo zjištěno, že vlastnosti nejsou pro pájení ideální díky přílišné délce očka. Teplo z celého očka se pak nestačilo odvádět do pájeného spoje. Bylo proto nakonec realizováno očko se stejným odporem, podobným průřezem - ovšem s menší délkou - tj. **bylo nutné použít materiál s větší rezistivitou místo mědi - mosaz**. Tak bylo umožněno realizovat očko ze silného a krátkého drátu (dobré mechanické vlastnosti a odvod tepla do spoje), aniž by byl elektrický odpor příliš malý. Došlo tedy k účelné koncentraci výkonu očka do malého objemu.

Shrňme na závěr přibližné požadované výstupní parametry měniče: 1V/500A

4 ZAPOJENÍ SILOVÉHO OBVODU

Konkrétní schéma zapojení silového obvodu měniče je na Obr. 3. Na primární straně jsou použity tranzistory MOS-FET fy Fairchild, typ FDH44N50 (44A, 500V, 0,12Ω). Jako demagnetizační diody jsou použity dvojdiody fy Fairchild, typ ISL9K860 (2x8A, 600V). V meziobvodu je použit impulsní elektrolytický kondenzátor C2 470 μF/400V. Co nejbližše tranzistorům a demagnetizačním diodám je v meziobvodu ještě připojen svitkový polypropylénový bezindukční kondenzátor C1 470nF/400V.

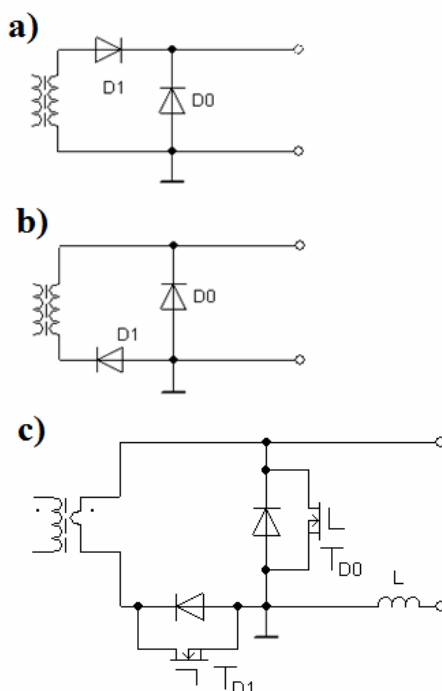
Pro účely řízení měniče je primární proud hlavního pulzního transformátoru snímán proudovým transformátorem.



Obr. 3 Schéma zapojení silové části měniče

Na sekundární straně je místo usměrňovací a nulové diody použit synchronní usměrňovač realizovaný tranzistory MOSFET za účelem zmenšení ztrát vedením velkého výstupního proudu. Na místě každé diody je proto použito 10 kusů IRF 2804 zapojených paralelně. Odpor kanálu v sepnutém stavu jednoho tranzistoru je $2\text{m}\Omega$, tj. výsledný odpor 10ks paralelně je cca $0,2\text{m}\Omega$. Při průchodu proudu 510A tak vzniká úbytek napětí pouze cca $0,1\text{V}$, zatímco v pasivním usměrňovači se Schottkyho diodami by úbytek činil minimálně $0,5\text{V}$. Popsaným řešením tedy výrazně redukuje ztrátový výkon na sekundárním usměrňovači (minimálně 5-krát).

Synchronní usměrňovač je pro měnič s malým výstupním napětím a velkým proudem standardním řešením.



Obr. 4 Topologie usměrňovače

Z Obr. 4 je patrné, že původní topologii diodového usměrňovače a) je nejprve nutno překonfigurovat na zapojení b) a pak teprve provést doplnění tranzistorů MOS-FET podle zapojení c). Tak se dosáhne toho, aby emitory obou tranzistorů byly na shodném potenciálu (zem řídicí elektroniky) a je tedy snadné je spínat bez použití budičů s galvanickým oddělením.

5 IMPULSNÍ TRANSFORMÁTOR MĚNIČE

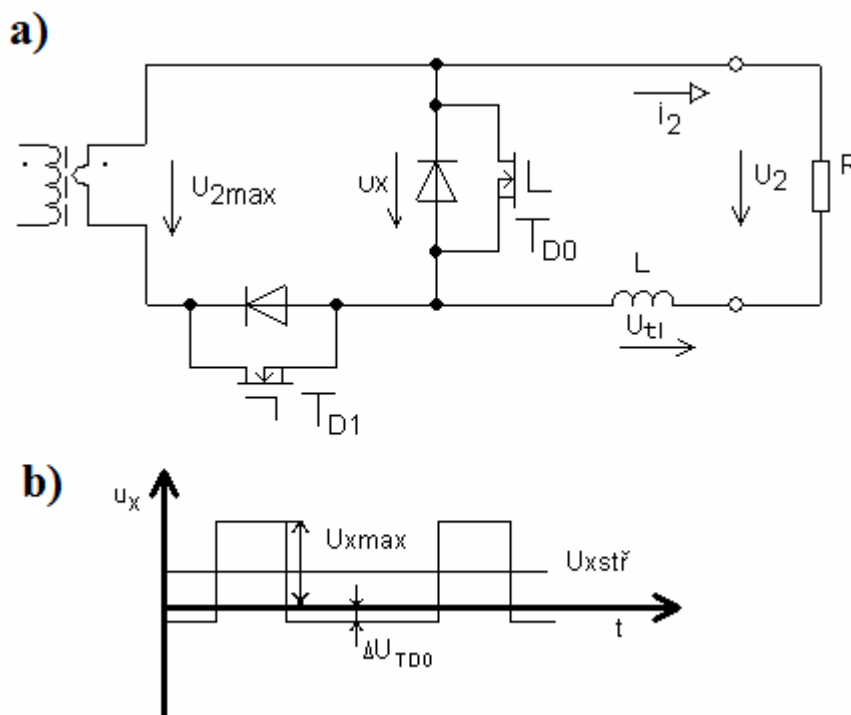
5.1 Návrh transformátoru

Pro jádro transformátoru byl vybrán toroid LJT 3813 z materiálu CF138. Spínací kmitočet měniče f je cca 100kHz. Maximální střída měniče s_{max} je cca 0,43. Tomu odpovídá maximální doba zapnutí:

$$t_{zap} = \frac{1}{f} s_{max} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-3}} 0,43 = 4,3 \mu s \quad (5.1)$$

Z důvodu nezbytné minimalizace rozptylu transformátoru realizujeme sekundární vinutí jako jediný „koaxiální“ závit z masivní mědi - viz obr. 6. **Počet závitů sekundárního vinutí N_2 se v pak musí rovnat jedné.** Díky této neobvyklé konstrukci transformátoru bude **rozptylová indukčnost prakticky zanedbatelná** a nebude tedy docházet při větším zatěžovacím proudu k zužování napěťových pulsů na nulové diodě sekundárního usměrňovače (napětí u_x v Obr. 3). Praktické ověření této skutečnosti je popsáno v kap. 9. Zmíněné zužování pulsů v případě zanedbatelného rozptylu u obvykle konstruovaného transformátoru je příčinou poklesu střední hodnoty napětí u_x tj. výstupního napětí měniče při velkém zatěžovacím proudu. V naší aplikaci (malé napětí, obrovský proud) by tento problém byl obzvláště dominantní.

Návrh převodu transformátoru:

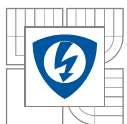


Obr. 5 Náhradní schéma sekundární části měniče

Úbytek napětí ΔU_{TD0} na tranzistoru T_{D0} synchronního usměrňovače je:

$$\Delta U_{TD0} = R_{DSon} \cdot I_2 = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 510 = 0,1V \quad (5.2)$$

kde $R_{DSon} = 0,2m\Omega$ je odpor v sepnutém stavu (10 ks IRF2804 paralelně)



Úbytek napětí na výstupní tlumivce U_{tl} dovolíme také cca 0,1V. Pak střední hodnota $U_{xstř}$ napětí u_x musí být:

$$U_{xstř} = U_2 + U_{tl} = 0,98V + 0,1V = 1,1V \quad (5.3)$$

Pro napětí $U_{xstř}$ současně jistě platí:

$$U_{xstř} = U_{x\max} \cdot s - \Delta U_{TD0} (1 - s) \quad (5.4)$$

Z tohoto vztahu vyjádříme a vypočteme potřebnou hodnotu napětí $U_{x\max}$:

$$U_{x\max} = \frac{U_{xstř} + \Delta U_{TD0} (1 - s)}{s} = \frac{1,1 + 0,1(1 - 0,43)}{0,43} = 2,7V \quad (5.5)$$

Úbytek ΔU_{TD1} na tranzistoru T_{D1} synchronního usměrňovače je shodný jako ΔU_{TD0} tj. 0,1V (opět 10ks IRF 2804 paralelně).

Pak potřebná špičková hodnota sekundárního napětí transformátoru bude:

$$U_{2\max} = U_{x\max} + \Delta U_{TD1} = 2,7 + 0,1 = 2,8V \quad (5.6)$$

Pozn.: Odpor vinutí transformátoru lze díky jeho konstrukci zanedbat.

Nyní lze vypočítat potřebný primární počet závitů transformátoru:

$$N_1 = \frac{U_D}{U_{2\max}} N_2 = \frac{300}{2,8} \cdot 1 = 107 \quad (5.7)$$

b) kontrola sycení a úprava převodu

Je třeba provést kontrolu sycení jádra transformátoru. Průřez jádra S_{Fe} je cca 77,5mm². Při $N_1 = 107$ z. by maximální hodnota sycení v jádře byla (při plné střídě):

$$B_{\max 1} = \frac{U_1 \cdot t_{zap}}{S \cdot N_1} = \frac{350 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}{77,5 \cdot 10^{-6} \cdot 107} = 0,18T \quad (5.8)$$

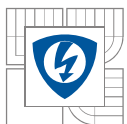
Pozn.. Napětí ss meziobvodu U_1 jsme v tomto výpočtu uvažovali 350V, což je předpokládaná maximální velikost při horní toleranci síťového napětí a při chodu měniče naprázdno.

Jedná se o zbytečně malou hodnotu sycení, a proto byl primární počet závitů snížen, aby se indukce zvýšila až na přípustnou mez 0,35T. Tím došlo ke zvýšení $U_{2\max}$ a měnič je tedy schopen dodávat větší napětí (tj. i větší výkon). Tedy:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot t_{zap}}{S \cdot B_{\max}} = \frac{350 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}{77,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,35} = 56 \quad (5.9)$$

$$U_{2\max} = \frac{N_1}{N_2} U_D = \frac{1}{56} 300 = 5,4V \quad (5.10)$$

Při použití měděného pájecího očka z kap. 3.2 máme tedy značnou napěťovou rezervu. Ta ovšem není na závadu - regulační obvody mohou snížit střidu.



Při použití očka s větším odporem může páječka dosáhnout při 510A maximálního výstupního napětí:

$$U_2 = (U_{2\max} - \Delta U_{TD1})s - \Delta U_{TD0}(1-s) - U_{il} = (5,4 - 0,1)0,43 - 0,1(1 - 0,43) - 0,1 = 2,1V \quad (5.11)$$

Tedy výstupní výkon může být až:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 2,1 \cdot 510 = 1070W$$

c) výpočet magnetizačního proudu

Indukčnost primárního vinutí transformátoru je:

$$L_1 = N_1^2 \cdot \Lambda = 56^2 \cdot 2100 = 6,58mH \quad (5.12)$$

kde $\Lambda = 2100nH$ je magnetická vodivost použitého toroidního jádra.

Špičková hodnota magnetizačního proudu pak je:

$$I_{\mu\max} = \frac{U_D \cdot t_{zap}}{L_1} = \frac{300 \cdot 4,77 \cdot 10^{-6}}{6,58 \cdot 10^{-3}} = 0,22A \quad (5.13)$$

d) návrh vodiče primárního vinutí

Při zanedbání magnetizačního proudu bude efektivní hodnota primárního proudu cca:

$$I_{1ef} = I_2 \frac{N_2}{N_1} \sqrt{s} = 510 \frac{1}{56} \sqrt{0,43} = 6A \quad (5.14)$$

Volíme proudovou hustotu v primárním vinutí $J_1 = 3A/mm^2$. Pak potřebný celkový průřez vf lana primárního vinutí musí být:

$$S_1 = \frac{I_{1ef}}{J} = \frac{6}{3} = 2mm^2 \quad (5.15)$$

Hloubka vniku (skinefekt) na kmitočtu 100kHz je cca:

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f[Hz]}} [mm] = \frac{75}{\sqrt{100000}} mm = 0,24mm \quad (5.16)$$

Pro vodič vinutí tedy smíme použít drát s průměrem maximálně:

$\varnothing_{drátu} = 2\delta = 2 \cdot 0,24 = 0,48mm$. Použijeme tedy „vf lano“ realizované ze smaltovaných drátů $\varnothing 0,5CuL$.

Potřebný počet vodičů lana:

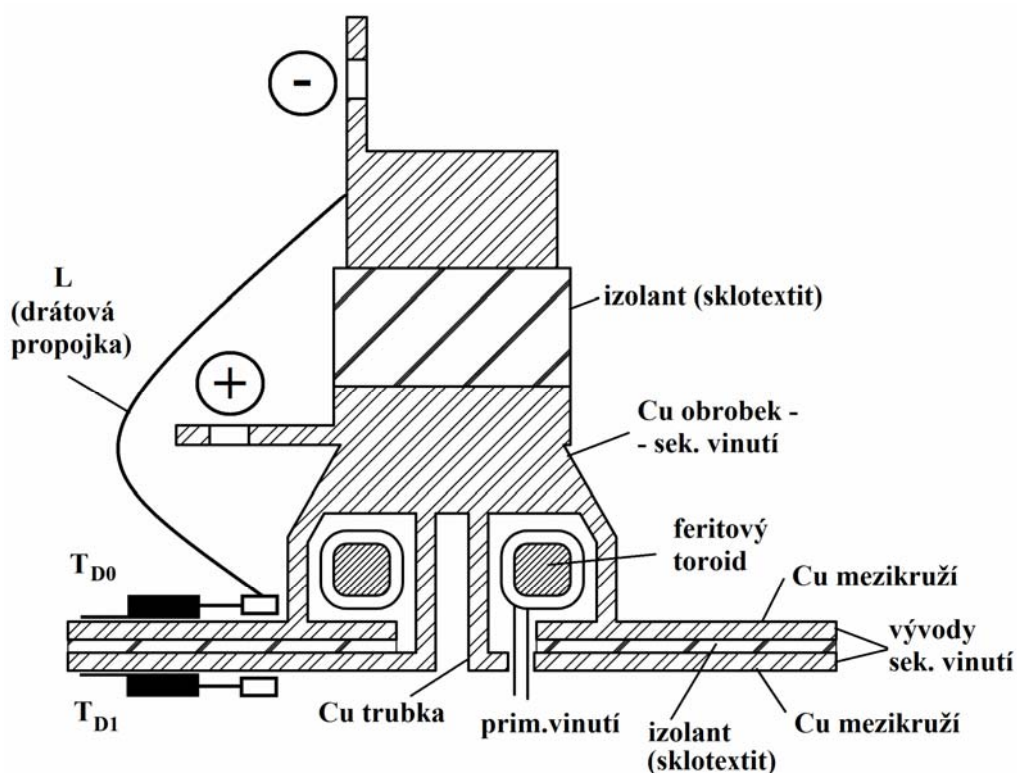
$$n = \frac{S_1}{\frac{\pi \varnothing^2}{4}} = \frac{2}{\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4}} = 10 \quad (5.17)$$

Pozn.: Sekundární vinutí (1 závit) je tvořeno masivním vysoustruženým kusem mědi a není třeba jej dále navrhovat.

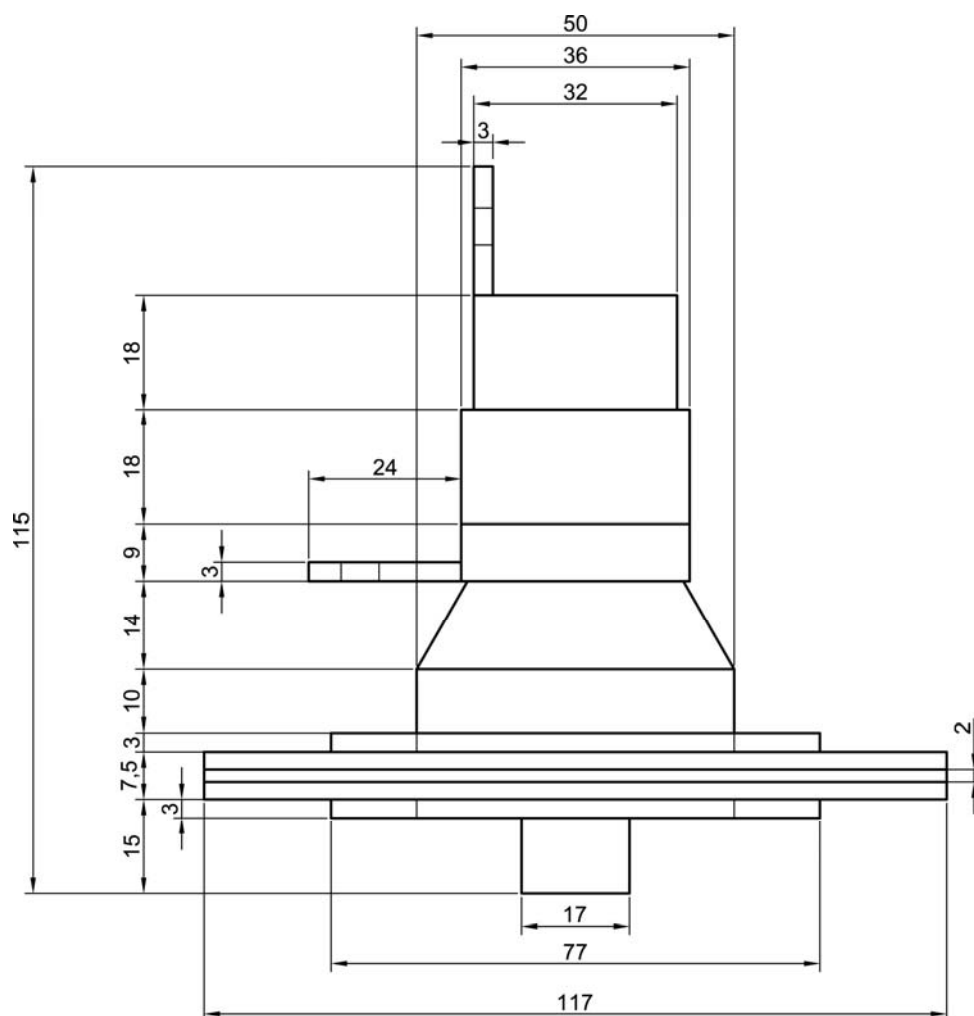
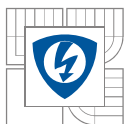
5.2 Konstrukce transformátoru

Měděné soustružené dílce tvořící koaxiální sekundární závit jsou současně použity jako chladiče tranzistorů T_{D0} a T_{D1} sekundárního synchronního usměrňovače. Tím je zajištěna potřebná minimální parazitní indukčnost mezi výstupem transformátoru a tímto usměrňovačem (umístění je co nejbližší) a je dosažena topologie umožňující rovnoměrné rozdělení proudů do jednotlivých paralelních tranzistorů. Mechanické provedení je naznačeno na Obr. 6. Fotografie transformátoru se synchronním usměrňovačem je na Obr. 18 v kap. 8.5. Náčrtek s konkrétními rozměry je na Obr. 7.

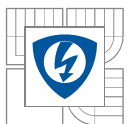
Výstupní tlumivka je ve skutečnosti realizována použitím delších obloukových drátových propojek mezi výstupy dílčích paralelních tranzistorů synchronního usměrňovače a společnou výstupní svorkou. Indukčnost podstatně zvyšují také přívodní kabely k pájecímu adaptéru. Díky malému výstupnímu napětí měniče a velkému pracovnímu kmitočtu velmi malá indukčnost takto realizované tlumivky zcela dostačující.



Obr. 6 Řez transformátorem



Obr. 7 Skutečné rozměry transformátoru



6 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ SILOVÉHO OBVODU

Tranzistory T_1 a T_2 na primární straně měniče

Špičková hodnota kolektorového proudu:

$$I_{C\max} = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu\max} = 510 \cdot \frac{1}{56} + 0,22 = 9,33 A \quad (6.1)$$

Efektivní hodnota kolektorového proudu je:

$$I_{Cef} = I_{C\max} \cdot \sqrt{s} = 9,33 \cdot \sqrt{0,43} = 6,12 A \quad (6.2)$$

Nejvyšší napětí, které se může vyskytnout na tranzistorech je (ve vypnutém stavu, bez uvážení překmitů):

$$U_{CE\max} = U_D = 350V \quad (6.3)$$

Byly zvoleny tranzistory FDH44N50 s dostatečnou rezervou parametrů: 44A, 500V, 0,12Ω

Ztráty vedením na každém tranzistoru jsou:

$$P_{ved} = I_{Cef}^2 \cdot R_{DS(on)} = 6,12^2 \cdot 0,12 = 4,49W \quad (6.4)$$

Přepínací ztráty:

$$P_{př} = \frac{I_{C\max} \cdot U_D (t_{on} + t_{off})}{4} f = \frac{9,33 \cdot 300 (100 \cdot 10^{-9} + 124 \cdot 10^{-9})}{4} 90 \cdot 10^3 = 14,1W \quad (6.5)$$

kde t_{on} a t_{off} jsou doby zapnutí a vypnutí tranzistoru FDH44N50.

Demagnetizační diody

Střední hodnota proudu diodou:

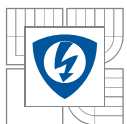
$$I_{FAV} = \frac{I_{\mu\max}}{2} \cdot s_{\max} = \frac{0,22}{2} \cdot 0,43 = 47,3mA \quad (6.6)$$

Pozn.: Vliv rozptylu transformátoru smíme zanedbat - díky jeho speciální konstrukci, viz kap. 5.1. Obvykle, při nezanedbatelném rozptylu bychom museli počítat s větší střední (a především špičkovou) hodnotou proudu demagnetizační diodou.

Napětí v závěrném směru:

$$U_R = U_D = 350V \quad (6.7)$$

Byly zvoleny diody ISL9K860, 2x8A, 600V. V jednom pouzdře jsou 2ks diod, které jsme zapojili paralelně.



Sít'ový usměrňovač (Graetzův můstek)

Nejvyšší střední hodnota výstupního proudu usměrňovače:

$$I_{D\max} = \frac{P_2}{U_D} = \frac{1070}{300} = 3,56 A \quad (6.8)$$

Střední hodnota proudu protékajícího každou diodou v můstku:

$$I_F = \frac{I_{D\max}}{2} = \frac{3,56}{2} = 1,78 \quad (6.9)$$

Napět'ové namáhání diod můstku je:

$$U_R = U_D = 350V \quad (6.10)$$

Ztráty vedením:

$$P_{ved} = 2U_F \cdot I_{D\max} = 2 \cdot 1 \cdot 3,56 = 7,1W \quad (6.11)$$

Byl zvolen můstek KBU4J (4A, 600V).

Tranzistory T_{D0} a T_{D1} na sekundární straně v synchronním usměrňovači

Jedná se o zapojení paralelní kombinace 2x10 tranzistorů, kde maximální proud jedním tranzistorem je:

$$I_{C\max} = \frac{I_2}{10} = \frac{510}{10} = 51A \quad (6.12)$$

Napětí ve vypnutém stavu odpovídá maximálnímu napětí na sekundárním vinutí:

$$U_{CE\max} = U_{2\max} = 5,4V \quad (6.13)$$

Byly zvoleny tranzistory MOS-FET IRF2804 75A, 40V, $R_{DSon} = 2m\Omega$.

Efektivní proud jedním tranzistorem T_{D1} :

$$I_{CD1ef} = I_{C\max} \cdot \sqrt{s} = 51 \cdot \sqrt{0,43} = 33,4A \quad (6.14)$$

Ztráty vedením na všech tranzistorech T_{D1} :

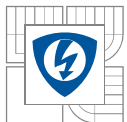
$$P_{ved1} = 10 \cdot I_{CD1ef}^2 \cdot R_{DSon} = 10 \cdot 33,44^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 22,4W \quad (6.15)$$

Přepínací ztráty tranzistorů T_{D1} (celá skupina 10ks paralelně):

$$P_{pr} = \frac{U_{2\max} \cdot I_2 (t_{on} + t_{off})}{4} \cdot f = \frac{5,4 \cdot 510 (133 \cdot 10^{-9} + 260 \cdot 10^{-9})}{4} \cdot 90 \cdot 10^3 = 24,3W \quad (6.16)$$

Efektivní proud jedním tranzistorem T_{D0} při plné střídě:

$$I_{CD0ef} = I_{C\max} \cdot \sqrt{1-s} = 51 \cdot \sqrt{1-0,43} = 38,5A \quad (6.17)$$

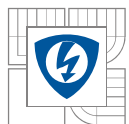


Ztráty vedením na všech tranzistorech T_{D0} při plné střídě:

$$P_{ved0} = 10 \cdot I_{CD0ef}^2 \cdot R_{DSon} = 10 \cdot 38,5^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 29,6W \quad (6.18)$$

Přepínací ztráty tranzistorů T_{D0} (celá skupina 10ks paralelně):

$$P_{př} = \frac{U_{2max} \cdot I_2 (t_{on} + t_{off})}{4} \cdot f = \frac{5,4 \cdot 510 (133 \cdot 10^{-9} + 260 \cdot 10^{-9})}{4} \cdot 90 \cdot 10^3 = 24,3W \quad (6.16)$$



7 ŘÍDICÍ OBVODY

7.1 Popis zapojení řídicích obvodů

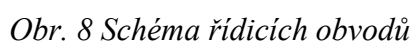
Schéma řídicích obvodů včetně budičů tranzistorů silového obvodu je na Obr. 8. Jako zdroj pulzně šířkové modulace byl použit integrovaný obvod UC3845, který je nastaven tak aby generoval obdélníkový signál požadované frekvence 90kHz s maximální střídou cca 43%. Nastavení maximální střídy a pracovní frekvence je provedeno volbou hodnot součástek C3, R12.

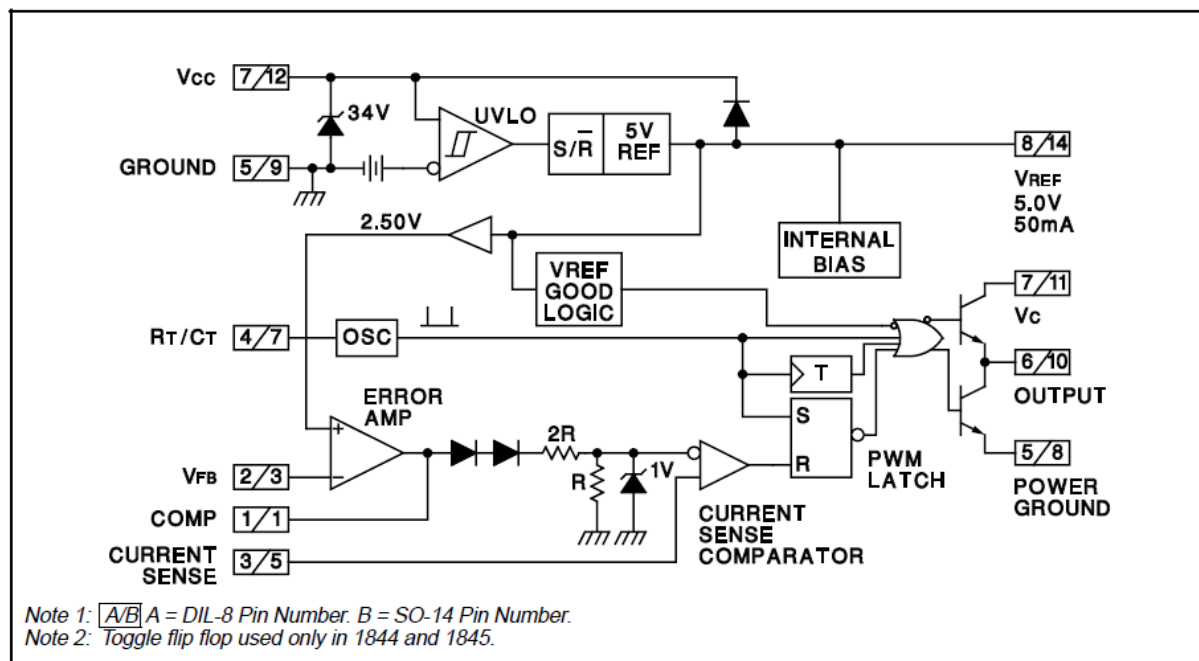
Vnitřní zapojení obvodu UC3845 je na Obr. 9. Omezení střídy bylo voleno s ohledem na to, aby se transformátor spolehlivě demagnetizoval. Díky existenci parazitní kapacity mezi kolektorem primárních tranzistorů a díky malé velikosti magnetizačního proudu je demagnetizace zpomalována (nabíjení parazitních kapacit po vypnutí tranzistorů). Proto je nutné maximální střídu volit menší než je teoretická dovolená hodnota 50%.

Spínací signál se přes budič s galvanickým oddělením přivádí na řídicí elektrody tranzistorů na primární straně měniče. Oba tyto tranzistory T_1 a T_2 je zapotřebí spínat shodným signálem, je však je galvanicky oddělit nejen od řídicích obvodů, ale i od sebe navzájem. Emitory těchto tranzistorů totiž nejsou na stejném potenciálu. Galvanické oddělení s malou parazitní kapacitou bylo provedeno pomocí toroidního oddělovacího transformátoru s feritovým jádrem. Použito je standardní zapojení budiče s oddělovacím transformátorem se současným přenosem signálu i energie pro buzení tranzistorů.

Tranzistor T_{D1} sekundárního synchronního usměrňovače je třeba spínat shodně s primárními tranzistory. Tranzistor T_{D0} pak musíme spínat signálem negovaným. Navíc je nutné mezi tyto dva spínací signály vložit odskok. Odskok je realizován analogově pomocí RCD členů R7, C7, D7 a R15, C8, D8. Vložená doba odskoku činí cca 1 μ s.

Zem řídicí elektroniky je spojena s emitory T_{D1} a T_{D0} , a proto budiče těchto tranzistorů nemusejí obsahovat žádné galvanické oddělení. Musejí však obsahovat výkonné koncové stupně s velkým výstupním proudem. Důvodem je velký počet tranzistorů zapojených paralelně (10ks) tj. velká vstupní kapacita gate-emitor. Koncové stupně jsou realizovány jako dvojčinné invertory s tranzistory MOS-FET (T_8 - T_{11} a T_7 - T_4). Problém se zkratovým příčným proudem tohoto invertoru při přepínání výstupní úrovně je odstranění použitím předřazeného budičího stupně realizovaného opět jako dvojčinný invertor MOS-FET (T_9 - T_{10} , T_6 - T_5) - ovšem s vloženým rezistorem 100 Ω omezujícím zkratový proud. Toto řešení pak zajistí, že v době přepínání jsou oba tranzistory budičího stupně sice současně sepnuty (proud omezen rezistorem), ale koncové tranzistory jsou současně oba vypnuty (zabránění zkratu).





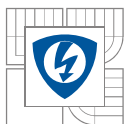
Obr. 9 Blokové schéma integrovaného obvodu UC3845[6]

7.2 Regulace výstupního proudu a nadproudová ochrana

Při zanedbání magnetizačního proudu je špičková hodnota primárního proudu transformátoru úměrná velikosti výstupního proudu. Namísto snímání skutečné hodnoty výstupního proudu proto snímáme primární proudové pulsy pomocí proudového transformátoru. Sekundární proud proudového transformátoru pak napájí bočník v podobě odporového děliče $R_{18}+R_{19}$ a R_{17} . Převod transformátoru a velikost $R_{18}+R_{19}$ jsou voleny tak, aby na něm při maximální požadované hodnotě výstupního proudu bylo napětí 1V. Toto napětí ovšem vykazuje lineárně rostoucí tendenci díky existenci magnetizačního proudu hlavního transformátoru a díky omezené indukčnosti výstupní tlumivky měniče. Komparací tohoto průběhu skutečného proudu (pin 3 UC3845) s nastavenou žádanou hodnotou proudu (pin 1 UC 3845) dochází přímo ke tvorbě PWM signálu a současně je realizována proudová regulační smyčka.

Celkové napětí z bočníku $R_{18}+R_{19}$ a R_{17} (až za špičkovým usměrňovačem D12, R16 a C16) dosahuje hodnoty 2,5V při hodnotě proudu, kdy má dojít k vybavení nadproudové ochrany. Ta je realizována pomocí vnitřního OZ v obvodu UC3845. Ten je původně určen k realizaci PI regulátoru nadřazené napěťové regulace, ale v našem zapojení ho používáme pouze jako komparátor. Pokud napětí na pinu 2 překročí 2,5V, překlopí se výstup komparátoru do nuly a zablokuje PWM modulátor (nulová střída). Díky špičkovému usměrňovači D12, R16, C16 pomine tento stav až opožděně po zániku nadproudu.

Přítomnost této nadproudové ochrany je nezbytná, protože samotný PWM komparátor vykazuje velké dopravní zpoždění, a tak samotná proudová regulace obvodu UC3845 neumí snížit střídu až na nulovou hodnotu. Následkem toho by byl nebezpečný nárůst výstupního proudu při činnosti se zkratem výstupních svorek.



7.3 Návrh transformátorku pro měření proudu

Byl zvolen toroid typu LJT 1305 z materiálu označeného jako CF 139.

Tabulkové hodnoty pro zvolené jádro:

$$S_{FE} = 14,6 \text{ mm}^2$$

$$A_L = 1250 \text{ nH}$$

Výpočet parametrů:

Nejvyšší snímaný primární proud (viz I_{cmax} v kap. 6): $I_{1max} = 9,5 \text{ A}$

Při tomto proudu má být na děliči R18+R19 a R17 napětí: $U_{Zmax} = 2,9 \text{ V}$

(2,5V + cca 0,4V úbytek na D11)

Výpočet součinu primárního a sekundárního počtu závitů proudového transformátorku, aby jeho magnetizační proud způsobil jen zanedbatelnou chybu měření:

$$K = N_1 N_2 \gg \frac{U_{Zmax} + U_F}{I_{1max} \cdot A_L} \cdot t_{1max} \quad (7.1a)$$

(převzato ze skript viz. Literatura odkaz [4])

Na primární straně přitom požadujeme pouze 1 závit (průvlek) $N_1 = 1$. Tedy:

$$K = 1 \cdot N_2 \gg \frac{(2,9 + 0,4) \cdot 5,075 \cdot 10^{-6}}{9,5 \cdot 1250 \cdot 10^{-9}} = 1,41 \quad (7.1b)$$

S ohledem na to, aby výstupní proud proudového transformátorku byl malý, volíme podstatně větší počet sekundárních závitů: $N_2 = 60$

Kontrola sycení toroidu:

$$B_{max} = \frac{(U_{Zmax} + U_F) \cdot t_{1max}}{N_2 \cdot S_{Fe}} = \frac{(2,9 + 0,4) \cdot 5,075 \cdot 10^{-6}}{60 \cdot 14,6 \cdot 10^{-6}} = 19,1 \text{ mT} \quad (7.2)$$

Vypočítanou hodnotu lze považovat korektní. Dále provedeme výpočet maximálního proudu výstupu z transformátoru:

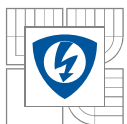
$$I_{2max} = \frac{I_{1max}}{N_2} = \frac{9,5}{60} = 0,158 \text{ A} \quad (7.3)$$

Jeho střední hodnota je:

$$I_{2AV} = I_{2max} \cdot s = 158 \cdot 10^{-3} \cdot 0,44 = 70 \text{ mA} \quad (7.4)$$

Ze střední hodnoty proudu, lze vypočíst ztrátový výkon na diodě D11:

$$P_{diody} = I_{2AV} \cdot U_F = 0,4 \cdot 70 \text{ mA} = 28 \text{ mW} \quad (7.5)$$



Určení velikosti odporů potřebných pro měření proudu:

Požadované napětí na děliči R18+R19 a R17 při plném proudu: $U = 2,9\text{V}$

Celkový odpor děliče tedy musí být:

$$R17 + R18 + R19 = \frac{U}{I_{2\max}} = \frac{2,9}{0,158} = 18,4\Omega \quad (7.6)$$

Na rezistoru R17 požadujeme při plném proudu napětí 1V. Tedy:

$$R17 = \frac{1}{0,142} = 6,8\Omega \quad (7.7)$$

$$R18 + R19 = 18,4 - 6,8 = 11,6\Omega$$

V realizaci pak je R17 6R8, R18 10R a R19 1R5.

7.4 Návrh budicího transformátorku

Byl zvolen toroid typu LJT 2010 z materiálu označeného jako CF 138.

Tabulkové hodnoty pro zvolené jádro:

$$S_{FE} = 20,6\text{mm}^2$$

$$A_L = 2900\text{nH}$$

Výpočet počtu primárních závitů pro $B_{\max} = 0,17\text{T}$:

$$N_1 = \frac{U_{CC} \cdot t_{1\max}}{B_{\max} \cdot S_{Fe}} = \frac{15 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,17 \cdot 48 \cdot 10^{-6}} = 9 \quad (7.8)$$

Z důvodu úbytků napětí dvou sériově zapojených diod na sekundární straně transformátorku byl navýšen počet sekundárních závitů:

$$N_2 = N_3 = 11 \quad (7.9)$$

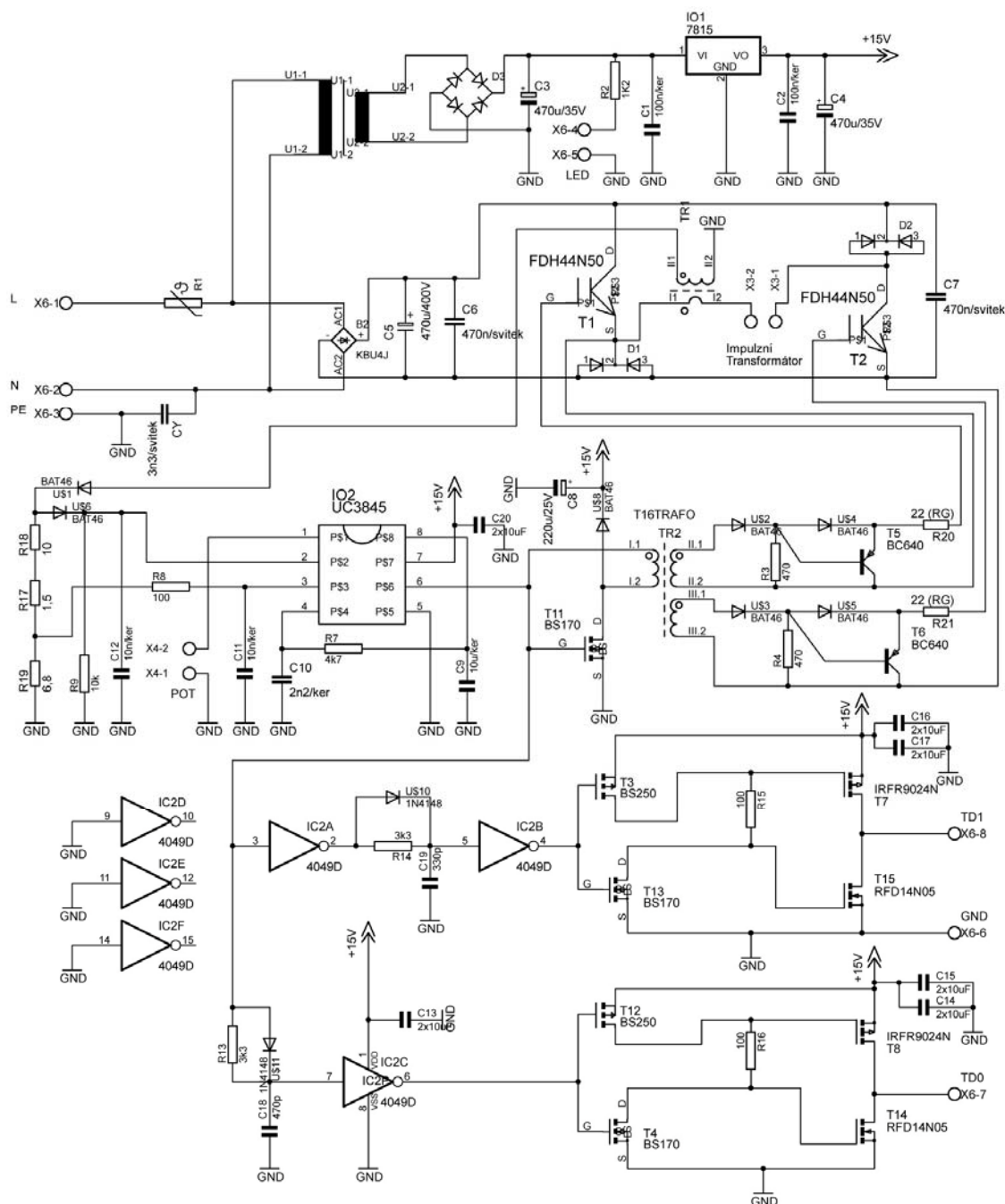
Navíjecí vodič je s teflonovou izolací dostatečně dimenzovaný.

8 REALIZACE PŘÍSTROJE

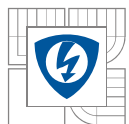
V této části diplomové práce jsou popsány všechny vyrobené komponenty a konkrétní použité součástky. Nejprve je popsána deska plošných spojů, následně zabudování celého zařízení do přístrojové krabice. Jako externí zařízení byl vyroben adaptér s pájecím očkem.

8.1 Celkové schéma zapojení

Celé zapojení primární části silového obvodu, řídicích a budičích obvodů je realizováno na jediné desce plošných spojů. Výsledné schéma zapojení je na Obr. 10. Konstrukce zbytku zapojení (sekundární část) byla popsána v kap. 5.



Obr. 10 Schéma zapojení primární strany silového obvodu a řídicích obvodů (deska plošných spojů)



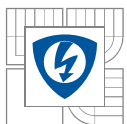
8.2 Rozpiska součástek ve schématu

Značení součástek odpovídá Obr. 10.

Tab. 1 Rozpiska součástek

Rozpiska součástek		
Značka	Popis typu	Pouzdro
R1	NTC	
R2	1k2	SMD 1206
R3	470	SMD 1206
R4	470	SMD 1206
R7	4k7	SMD 1206
R8	100	SMD 1206
R13	3k3	SMD 1206
R14	3k3	SMD 1206
R15	100	SMD 1206
R16	100	SMD 1206
R17	1,5	0207/12
R18	10	0207/12
R19	6,8	0207/12
R20	22 (RG)	0207/12
R21	22 (RG)	0207/12
C1	100n	SMD1206
C2	100n	SMD1206
C3	470u/25V	E5-10,5
C4	470u/25V	E5-10,5
C5	470u/400V	
C6	330n/sv	C225-087×268
C7	330n/sv	C225-087×268
C8	220u/25V	E3,5-8
C9	10u	SMD1210
C10	2n2/sv	C050-045×075
C11	10n	SMD1206
C12	10n	SMD1206
C13-17	10ks 10u	SMD1210
C18,C19	470p, 330p	SMD1206
CY	3n3/sv	C102-043×133
X3	2 svorky	WAGO 5,08
X4	2 svorky	WAGO 5,08
X6	4 × 2 svorky	WAGO 5,08
B2	KBU4J	KBU

Rozpiska součástek		
Značka	Popis typu	Pouzdro
D3	B250C1000SMD	SO4
IO1	7815	TO220STO
IO2	UC3845	DIL8
IC1	4049	SO16
TR1	I-trafo	LJT 1305
TR2	Odděl. trafo	LJT 1807
TR3	TRHEI481 1×15V	
T1	FDH44N50	TO247STO
T2	FDH44N50	TO247STO
T3	BS250	TO92FET
T4	BS170	TO92FET
T5	BC640	TO92
T6	BC640	TO92
T7	IRFR9024N	DPAK
T8	IRFR9024N	DPAK
T11	BS170	TO92FET
T12	BS250	TO92FET
T13	BS170	TO92FET
T14	RFD14N05	DPAK
T15	RFD14N05	DPAK
D1	ISL9K860P3	TO220STO
D2	ISL9K860P3	TO220STO
U\$1	BAT46	SOT80
U\$2	BAT46	SOT80
U\$3	BAT46	SOT80
U\$4	BAT46	SOT80
U\$5	BAT46	SOT80
U\$6	BAT46	SOT80
U\$8	BAT46	SOT80
U\$10	1N4148	SOT80
U\$11	1N4148	SOT80

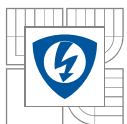


8.3 Soupis součástek

Seznam všech součástek, které jsou použity pro výrobu desky plošných spojů.

Tab. 2 a) Soupis součástek

Soupis součástek			
Druh	Název	ks	pouzdro
Diody	BAT46	6	SOT80
	1N4148	2	SOT80
	ISL9K860P3	2	TO220STO
	LED	1	5mm
Graetz. můstky	B250C1000SMD	1	SO4
	KBU4J	1	KBU
Tranzistory	BS170	3	TO92FET
	BS250	2	TO92FET
	FDH44N50	2	TO247STO
	IRFR9024N	2	DPAK
	RFD14N05A	2	DPAK
	BC640	2	TO92
Int. Obvody	7815	1	TO220STO
	UC3845	1	DIL8
	4049	1	SO16
Odpor	NTC	1	
	1,5	1	0207/12
	6,8	1	0207/12
	10	1	0207/12
	22 (RG)	2	0207/12
	100	3	SMD 1206
	470	2	SMD 1206
	1k2	1	SMD 1206
	3k3	2	SMD 1206
	4k7	1	SMD 1206
Potenciometr	10k/N	1	
Kondenzátory	10n	2	SMD 1206
	100n	2	SMD 1206
	10u	12	SMD 1210
	330p,470p	1+1	SMD 1206
	2n2/ker	1	C050-045×075
	3n3/sv	1	C102-043×133
	330n/sv	2	C225-087×268
	220u/25V	1	E3,5-8
	470u/35V	2	E5-10,5
	470u/400V	1	

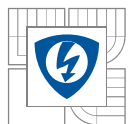


Tab. 2 b) Soupis součástek

Soupis součástek			
Druh	Název	ks	Pouzdro
Transformátory	síťový TRHEI481 1×15V	1	
	oddělovací	1	
	proudový	1	
Svorkovnice	Dvojitá WAGO 5,08mm	6	

Tab. 3 Navíjecí předpisy transformátorků

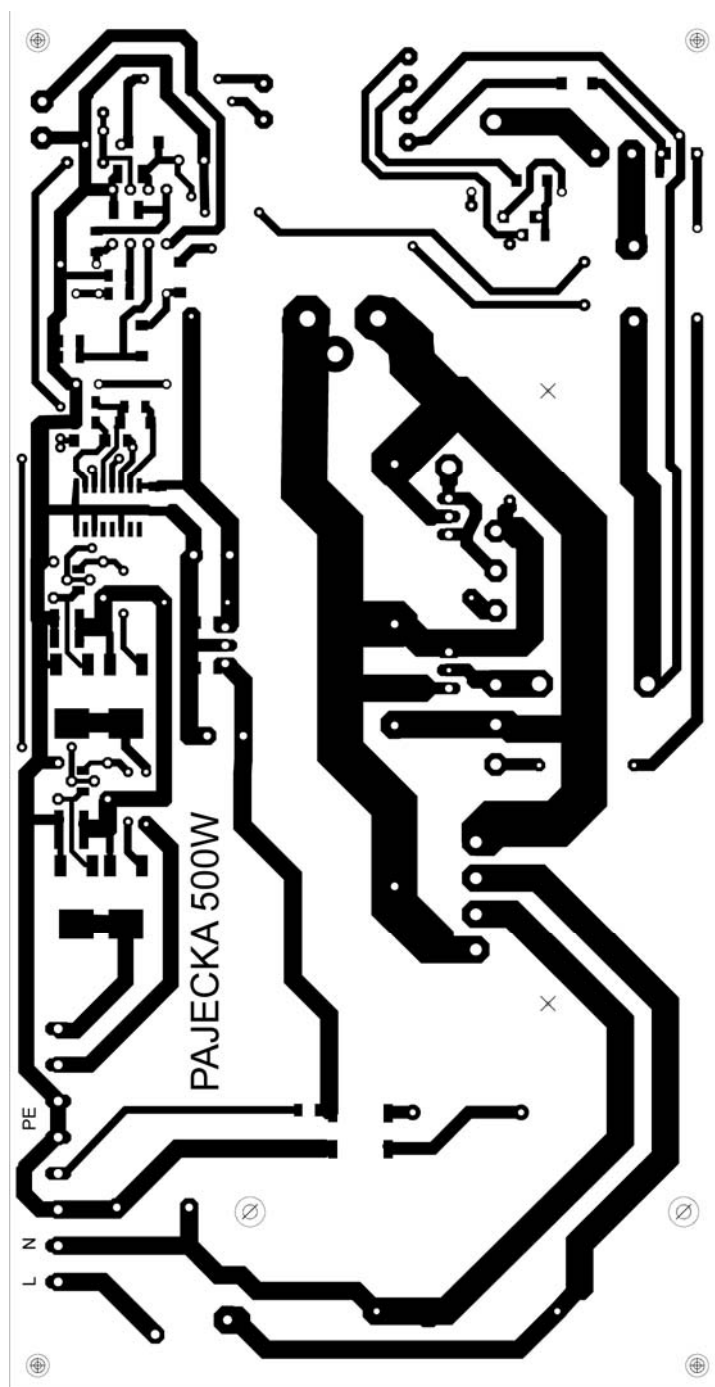
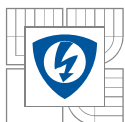
Transformátor	Jádro toroid	N ₁	N ₂	Ø drátu (mm)	poznámka
TR1 proudový	LJT 1305	-	60	0,355CuL	primární vinutí: 1 průvlek
TR2 oddělovací	LJT2010	9	11+11	0,4mm teflon	všechna vinutí rovnoměrně rozprostřít podél celého toroidu



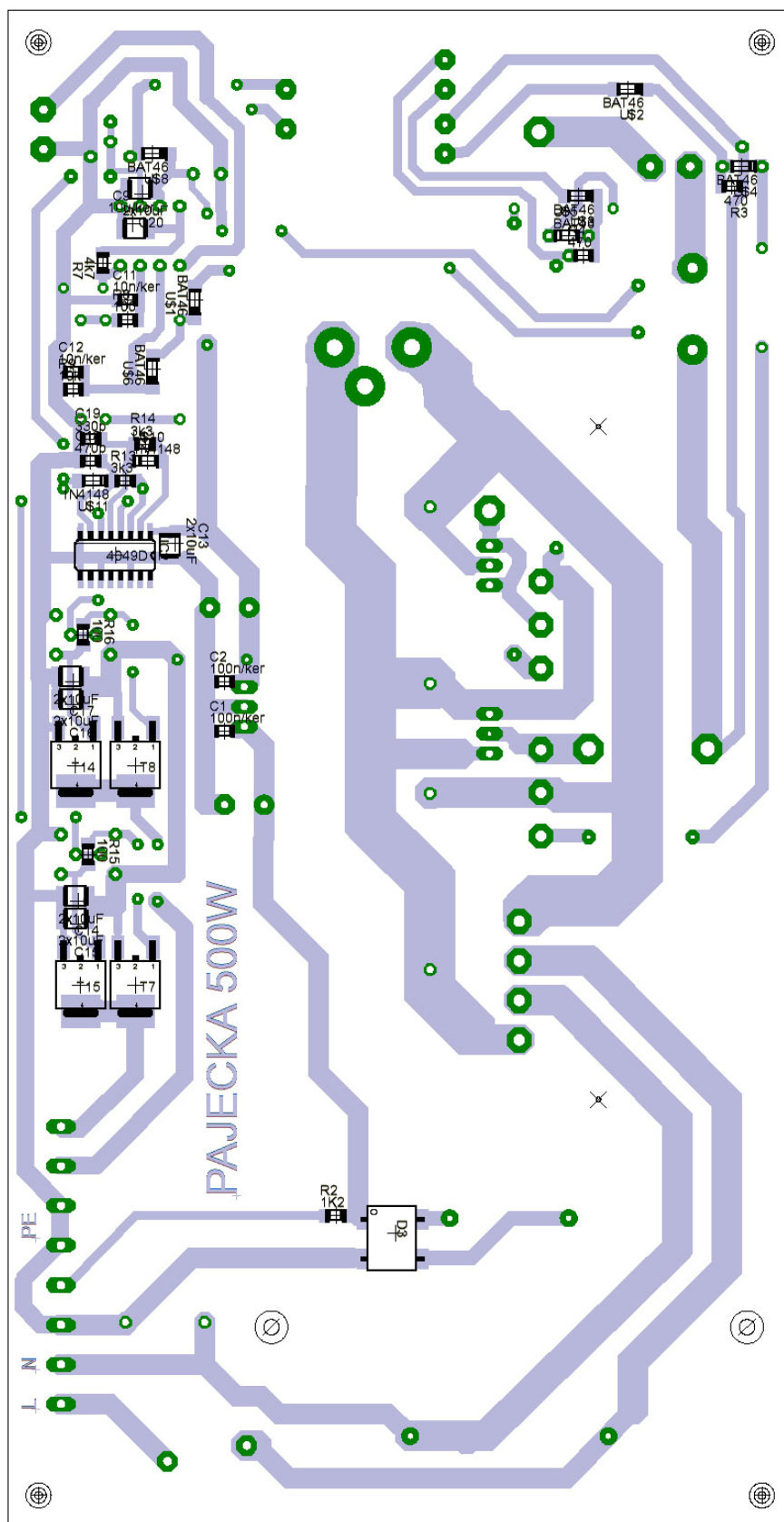
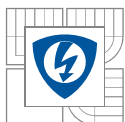
8.4 Deska plošných spojů

Pro výrobu desky plošných spojů byla zvolena technologie výroby s jednou stranou plošných spojů. Hlavními výhodami této technologie jsou jednoduchost výroby a nízké výrobní náklady. Mezi nevýhody lze počítat větší množství drátových propojek. Na straně spojů jsou umístěny SMD součástky – většina odporů, kondenzátorů a polovodičových součástek, které jsou zapotřebí pro nesilové řídicí obvody zařízení. Ostatní součástky nesilové části jsou malých rozměrů a jejich parametry nevyžadují montáž přídavného chladiče.

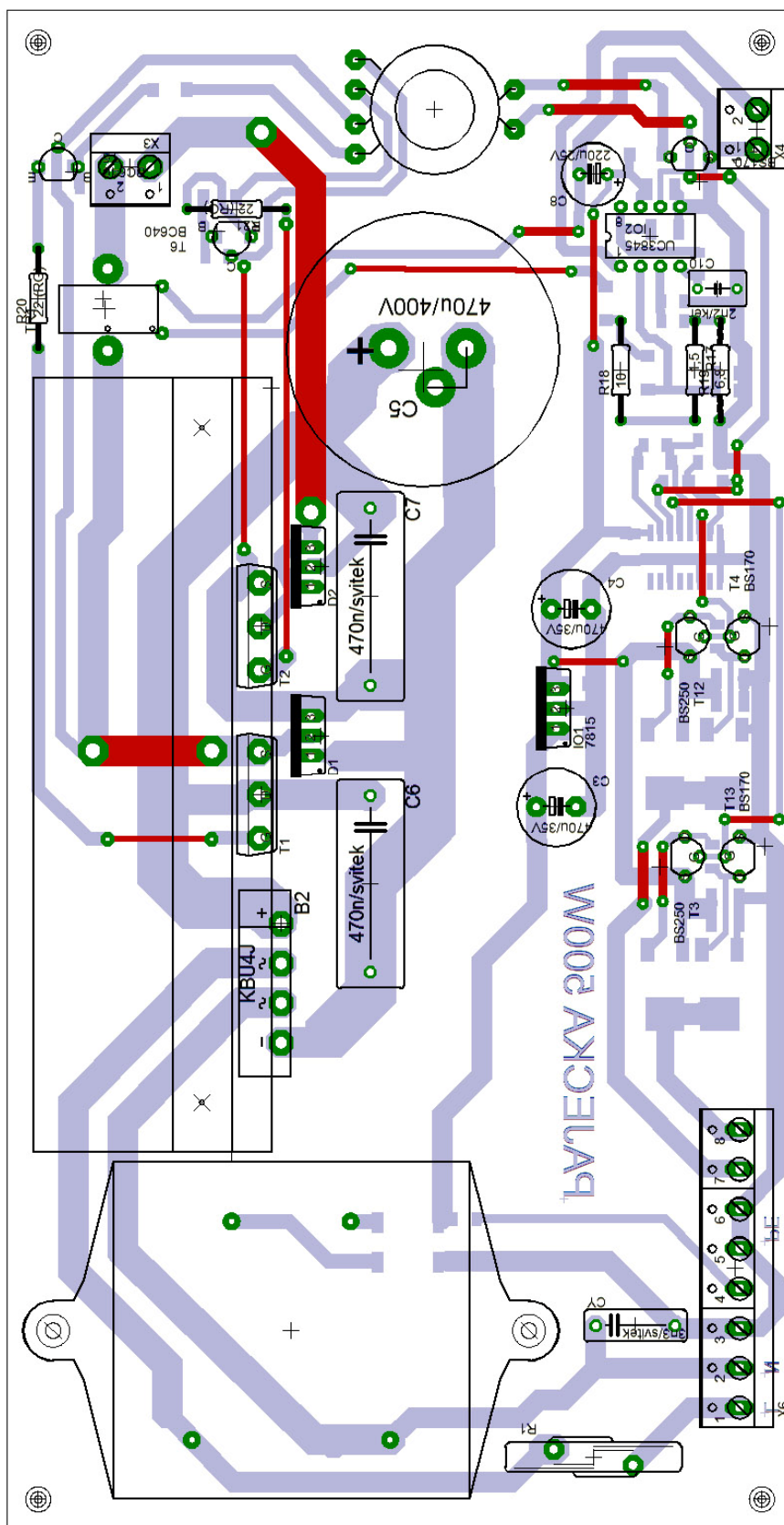
Silová část je na obrázcích jasně patrná podle širších spojů. Byla dodržena izolační vzdálenost 7mm od nízkonapěťové řídicí části. Při návrhu bylo potřeba dělat nejširší možné spoje z důvodu minimalizace jejich odporu a parazitní indukčnosti. Kritické součástky silového obvodu jsou vhodně umístěny v nejmenších možných vzdálenostech, kvůli minimalizaci hodnoty parazitní indukčnosti mezi součástkami: kondenzátor C6, tranzistor T1 a dioda D1, v druhé větvi analogicky kondenzátor C7, tranzistor T2 a dioda D2. Kondenzátor C5 je umístěn v malé vzdálenosti od tohoto zapojení. Všechny tyto součástky jsou větších rozměrů než SMD součástky, a jsou umístěny na druhé straně desky. Hlavní výkonové tranzistory T1 a T2 jsou přes keramickou podložku upevněny na hliníkový chladič, na kterém je zároveň upevněn i Graetzův můstek usměrňující síťové napětí.



Obr. 11 Deska plošných spojů



Obr. 12 Osazovací plán ze strany spojů – SMD součástky



Obr. 13 Osazovací plán ze strany součástek

Popis vývodů jednotlivých svorkovnic:

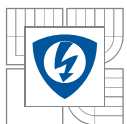
X3: 1 – konec primárního vinutí, 2 – začátek primárního vinutí transformátoru

X4: 1 – potenciometr GND, 2 – potenciometr

X6: 1 – síť L, 2 – síť N, 3 – síť PE (GND), 4 – LED dioda +, 5 – LED dioda -, 6 – GND,
7 – T_{D0} , 8 – T_{D1}



Obr. 14 Vyrobená a osazená deska



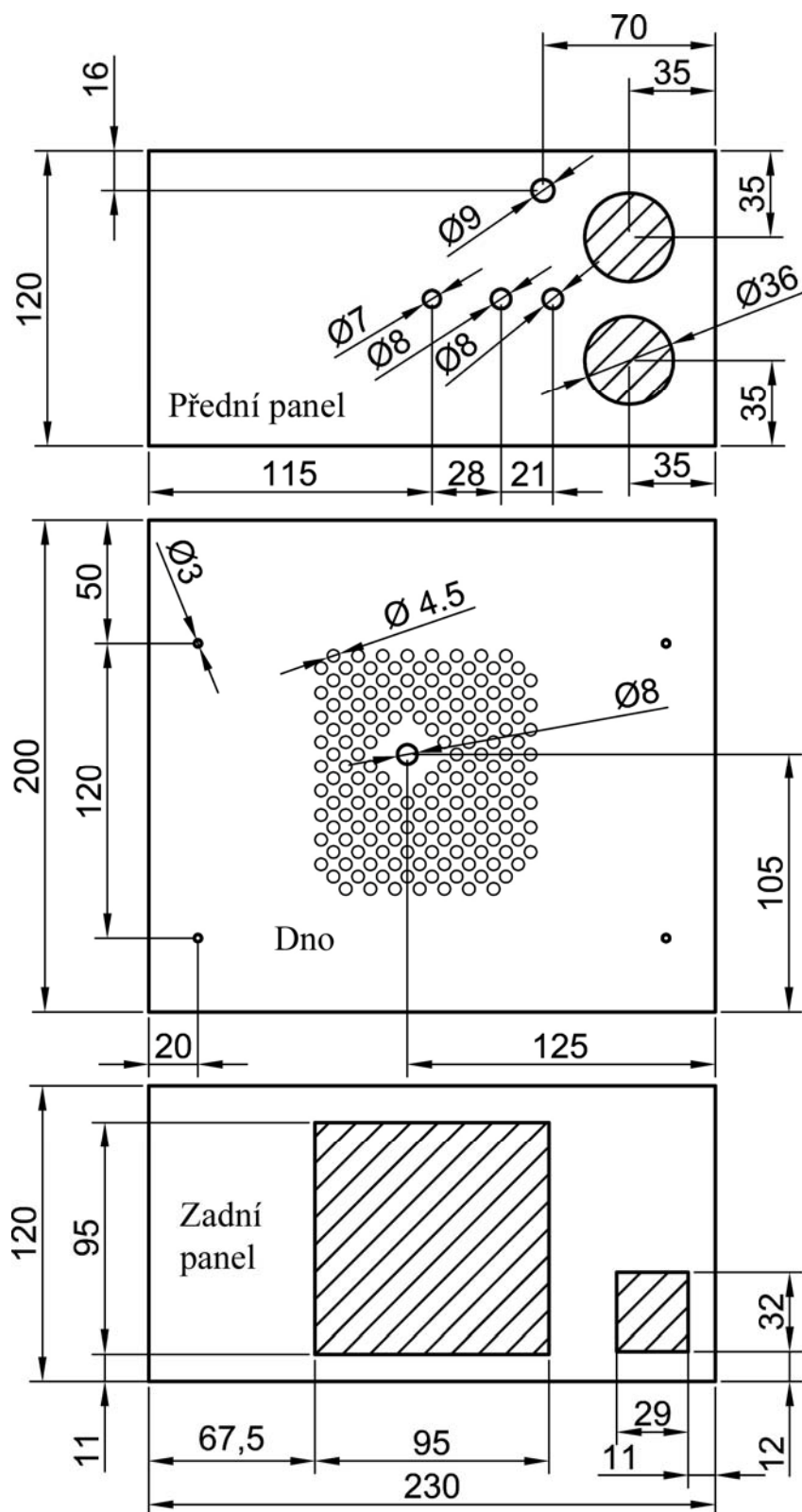
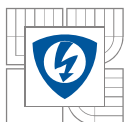
8.5 Pájecí stanice

Silový impulsní transformátor a všechny řídicí obvody jsou zabudovány do plechové přístrojové krabice. Podle návrhu byla vybrána plechová krabice o vnějších rozměrech 234x124x217mm. Byl tedy vyroben zdroj velkého proudu, s výstupem na dvou bajonetových konektorech, do kterých je možno zapojit různé adaptéry podle potřeby.

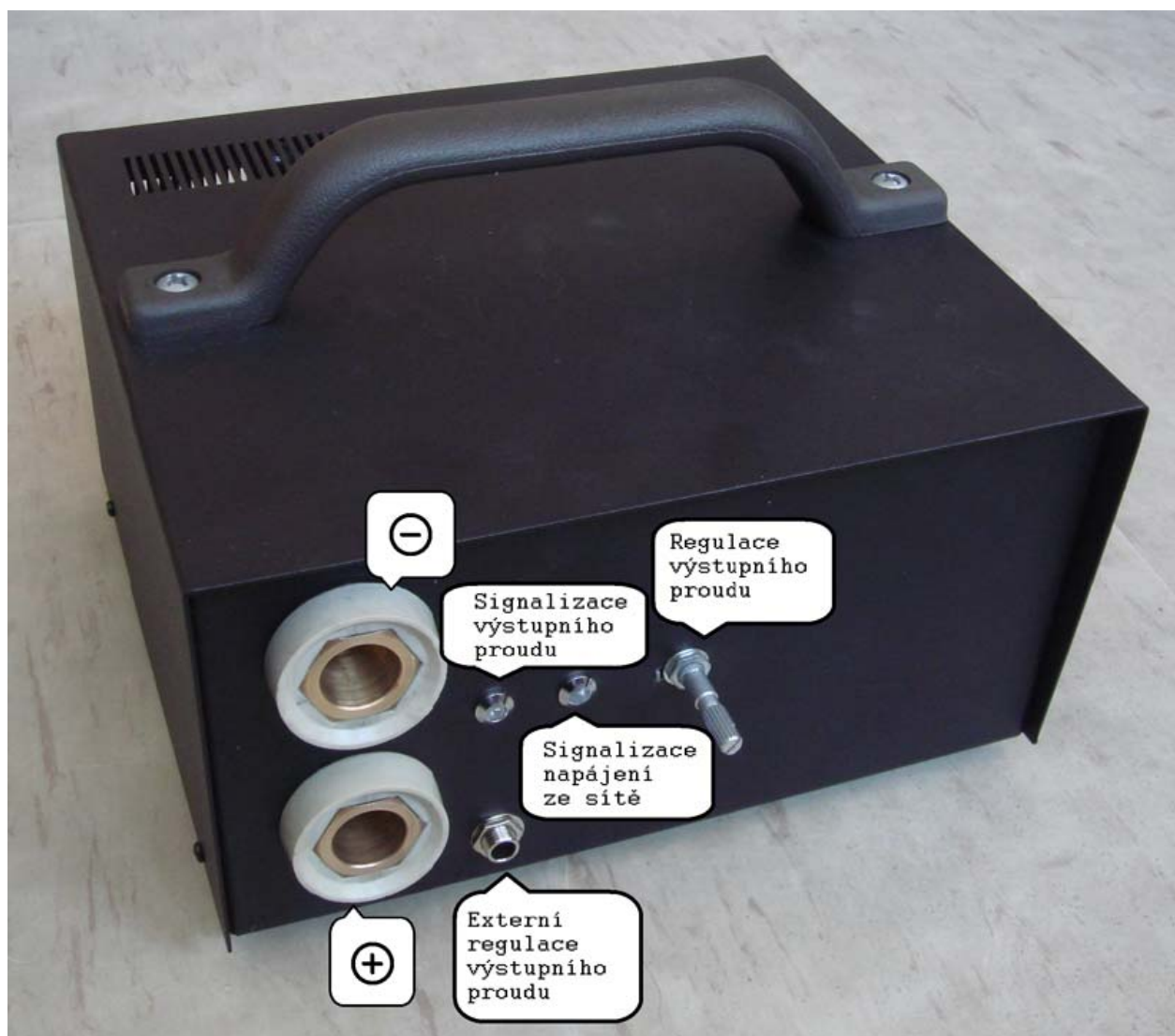


Obr. 15 Přístrojová krabice typ U-KK12-231

V zadní části krabice byly vytvořeny otvory pro ventilátor a napájecí konektor. Ventilátor je zakrytý mřížkou, nasává vzduch a vhání ho dovnitř krabice. Přímě před ventilátorem je umístěn transformátor, který potřebuje být chlazen ofukujícím vzduchem. Ohřátý vzduch vystupuje nahoře vzadu otvory ve víku a vytvořenými otvory na dně krabice. Na dně jsou přidané nožky, aby byla pod krabicí mezera nad podložkou. Na lemu boční strany je pomocí zápusťných šroubů a distančních sloupků připevněna deska plošných spojů, vše je provedeno tak, aby se dalo bez problémů nasadit víko krabice. Na víku je přišroubováno plastové držadlo pro snadnější manipulaci se zařízením. V čelním panelu jsou vytvořeny otvory pro bajonetové konektory, dále pro signalizaci LED, pro potenciometr a pro zásuvku JACK. Zásuvka JACK je připojena paralelně k potenciometru a slouží k externímu dálkovému ovládání výstupního proudu z pájecího adaptéru. Rozmístění otvorů a jejich rozměry jsou na Obr. 16. Transformátor je přišroubován ke dnu krabice, jeho výstupní svorky jsou připojeny ke konektorům na předním panelu pomocí kabelových ok a kabelu 50mm².



Obr. 16 Rozmístění vytvořených otvorů v krabici



Obr. 17 Popis vývodů na předním panelu

Seznam použitých součástek:

Přístrojová krabice U-KK12-231

Ventilátor SUNON DP200A, 120×120mm, 220-240V, 50/60Hz, 0,14A

Krycí mřížka pro ventilátor 120×120mm

Napájecí vstupní konektor obsahující odrušovací filtr a pojistku EMI FILTER DL-6DZ2R 250V 50/60Hz, 6A

Svářecí konektory bajonet 35/50mm² do panelu

Kabelová oka 8/50 a 12/50

Kabel simplex GCE 50mm²

LED reflektor chrom pro 5mm diodu

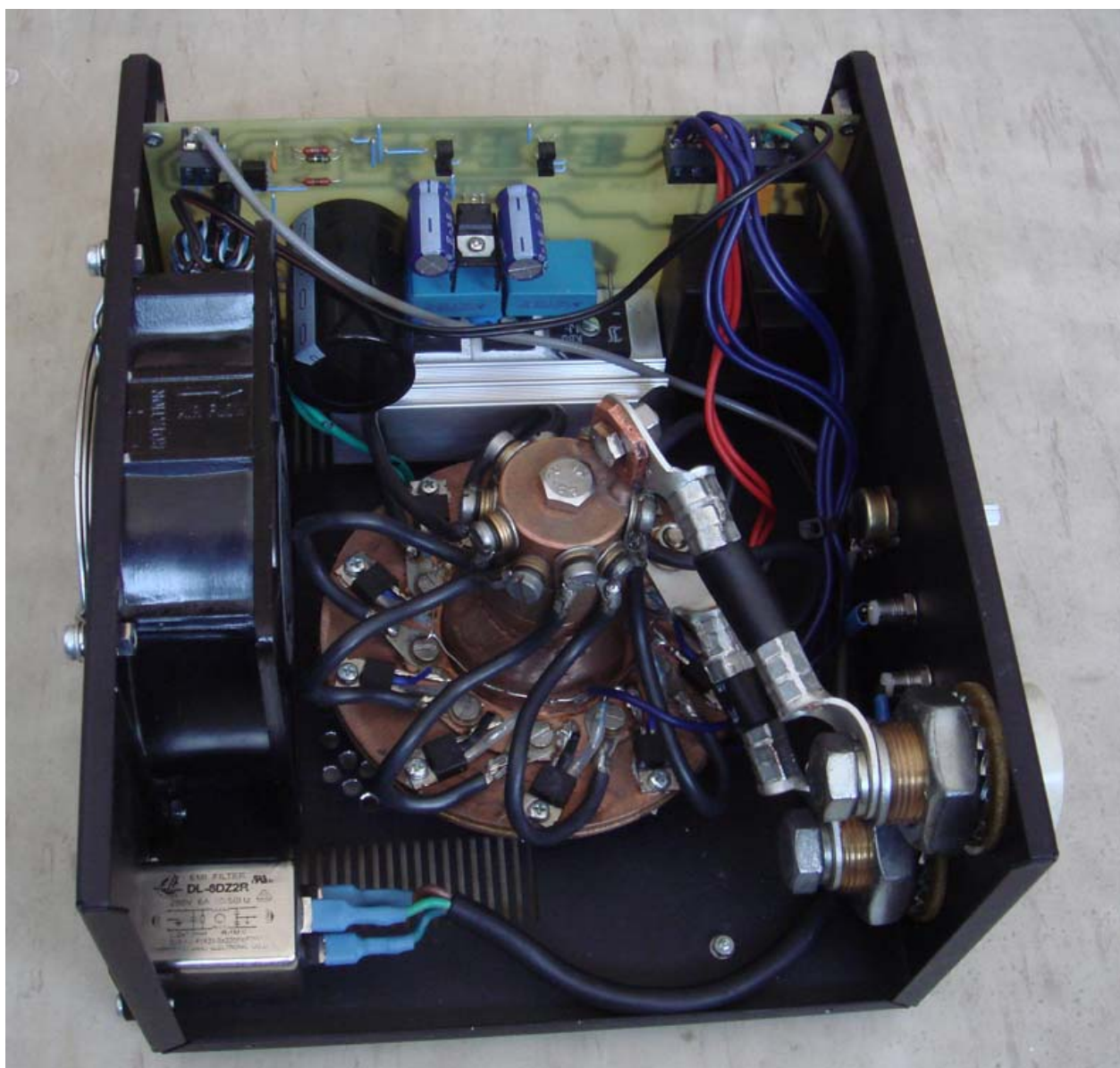
Zásuvka JACK 6,3 mono do panelu

Distanční sloupky matka-matka M3×10mm

Nožky přístrojové gumové GF2 Ø17×9mm

Plastové držadlo hnědé

Spojovací materiál



Obr. 18 Rozmístění jednotlivých komponent



Obr. 19 Jiný pohled na rozmístění komponent

8.6 Pájecí adaptér

Pájecí adaptér je periferní zařízení, které je možné zapojit do pájecí stanice. Je vyroben ze dvou kusů měděných tyčí ohnutých o 90°. Tyče jsou spojeny šrouby M3 a mezi sebou izolovány keramickými podložkami a pertinaxovou destičkou. Samotné šrouby jsou odizolovány teflonovými podložkami odolávající vyšším teplotám. Na koncích měděných tyčí je vyroben závit, do kterého jsou zašroubovány a zapájeny mosazné šrouby M8. Na takto vzniklý komplet je na jedné straně přišroubováno pájecí očko z mosazného drátu vhodného tvaru. Na straně druhé jsou přišroubována kabelová oka. Propojovací kabely jsou dlouhé 80cm s kabelovými oky a bajonetovými konektory, které lze zapojit do pájecí stanice. Odpor jednoho kabelu je 0,4mΩ. Vypočtené ztráty způsobené proudem procházejícím kabely jsou cca 2×100W při maximálním proudu 500A.

Rozměry očka: délka 20cm, Ø 4mm, materiál – mosaz



Obr. 20 Pájecí adaptér

Seznam použitých součástek:

Měděná tyč plochá 16×4mm

Mosazný drát Ø4mm

Mosazné šrouby a matky M8

Keramické podložky

Teflonové izolační podložky

Pertinaxová deska

Kabelová oka 8/50

Kabel simplex GCE 50mm²

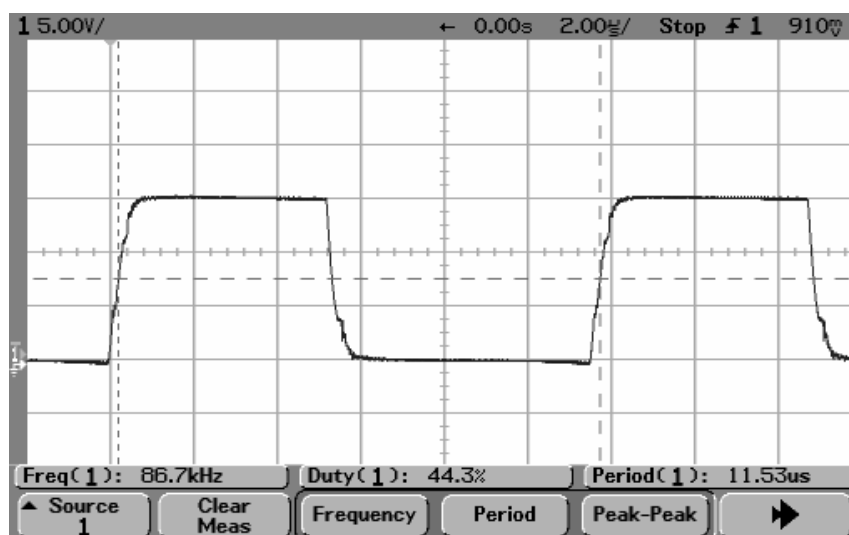
Svářecí konektory bajonet 35/50mm² na kabel

Spojovací materiál

9 KONTROLNÍ MĚŘENÍ

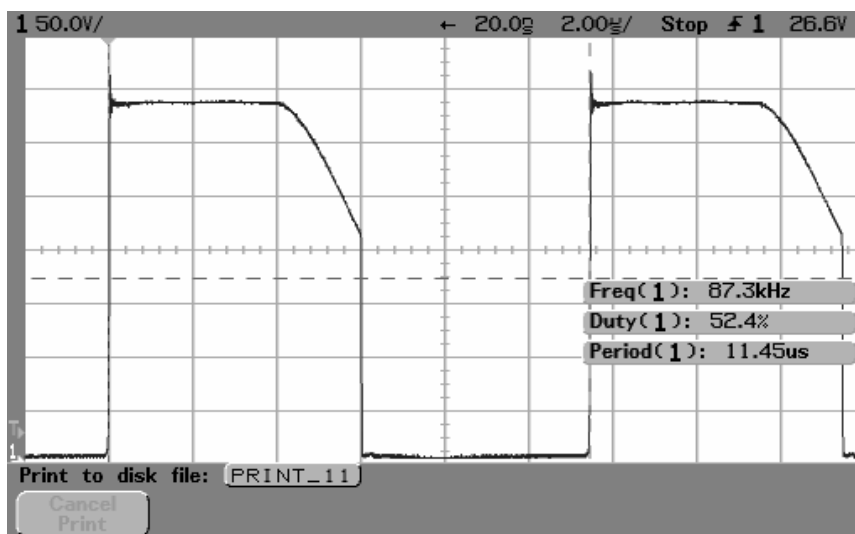
Při ožiování přístroje byla nastavena hodnota maximálního výstupního proudu na cca 450A (rezistorem R19 v Obr. 10). Jedná se o poněkud menší hodnotu než uvažovaných 510A, ovšem pro účely pájení je to hodnota dostatečná. Při vhodném odporu pájecího oka lze při tomto proudu dosáhnout maximálního výstupního napětí na svorkách páječky cca 2V. Tomu odpovídá výstupní výkon 900W, což převyšuje výkon požadovaný v zadání.

Na Obr. 21 je průběh napětí gate-emitor primárních tranzistorů měniče (měřeno na dolním tranzistoru) při maximální střídě. Patrný je spínací kmitočet 87kHz a max. střída 0,44. Měření na Obr. 21 bylo provedeno s plným napětím ss meziobvodu měniče, ale bez zátěže. Proto jsou „pomlčky“ na prahovém napětí u_{GE} poměrně nevýrazné.



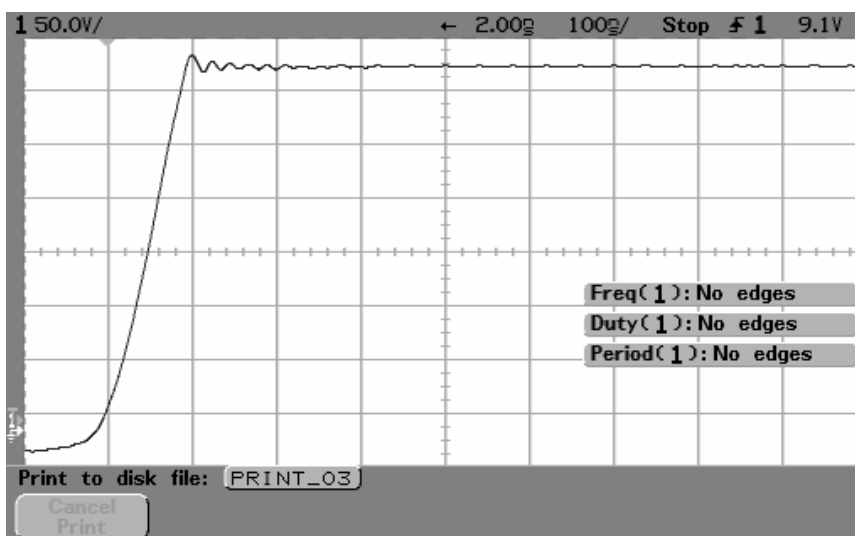
Obr. 21 Napětí u_{GE} primárních tranzistorů ($U_D=350V$, bez zátěže měniče)

Spolehlivou demagnetizaci transformátoru znázorňuje Obr. 22. Na něm je průběh napětí kolektor-emitor dolního primárního tranzistoru (T_2). Po vypnutí nejprve napětí dosahuje maximální hodnoty U_D (probíhá demagnetizace transformátoru), pak se objeví pokles napětí (obloukový tvar) - ten odpovídá době, kdy již demagnetizace skončila, tj. demagnetizační diody se zavřely a mezi kolektor a emitor vypnutého tranzistoru tedy již není vnucováno definované napětí meziobvodu U_D . Díky parazitním kapacitám vypnutého tranzistoru a zavřené demagnetizační diody vzniká pouze nelineární kapacitní dělič. Přítomnost popisovaného „oblouku“ na konci doby vypnutí je důkazem spolehlivé rezervy pro demagnetizaci.



Obr. 22 Napětí u_{CE} na tranzistoru T_2 bez zátěže

Na Obr. 23 je detail vypínání primárních tranzistorů při chodu měniče naprázdno. Je patrná malá strmost du/dt - parazitní kapacita kolektor-emitor je nabíjena při vypnutí pouze malým magnetizačním proudem transformátoru. Tento jev je příčinou nutnosti omezit maximální střídu měniče na hodnotu menší než teoretických 50%. V průběhu je také patrný vznik parazitních LC tlumených kmitů s vysokou frekvencí (tzv. ringing). Vhodným geometrickým uspořádáním a způsobem buzení tranzistorů je však ringing minimální. Jedná se o typický doprovodný jev vypínání rychlých tranzistorů MOS-FET, který by při větší velikosti mohl způsobovat problémy EMC a také by díky Millerově kapacitě mohl vést ke vzniku kladné zpětné vazby tj. kmitání výkonového tranzistoru (zničení).



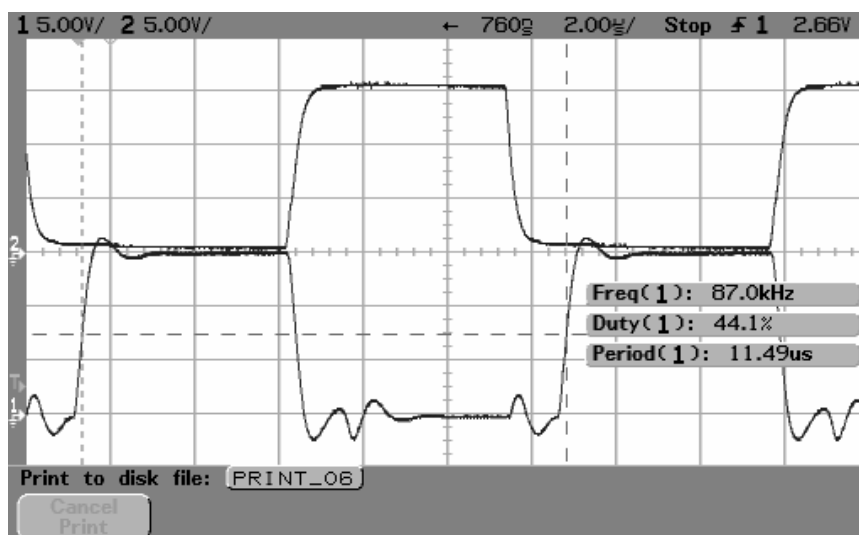
Obr. 23 Detail náběžné hrany při vypínání tranzistoru T_2 (měnič bez zátěže)

Na Obr. 24 je patrná součinnost spínání tranzistorů T_{D0} a T_{D1} synchronního usměrňovače. Je vidět vložený odskok cca $1\mu\text{s}$.



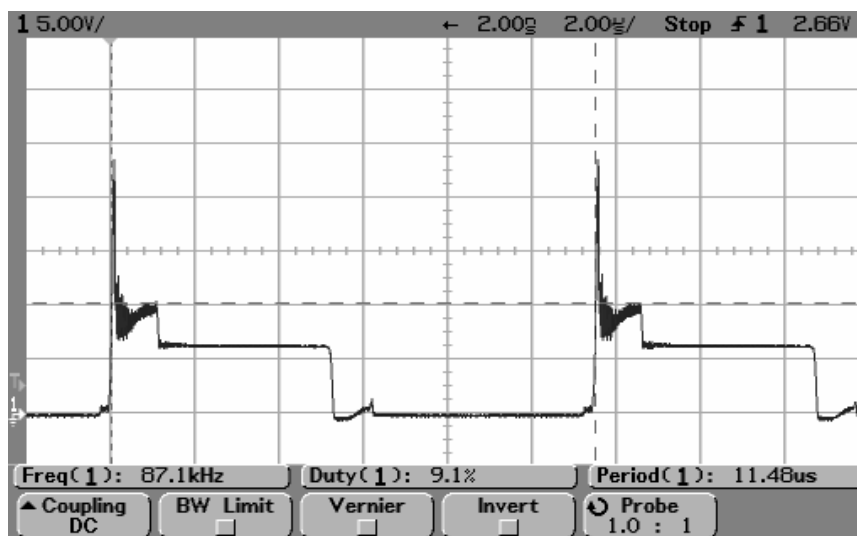
Obr. 24 Napětí u_{GE} na tranzistorech T_{D0} a T_{D1} synchronního usměrňovače

Obr. 25 dokumentuje součinnost spínání primárních tranzistorů a synchronního usměrňovače.



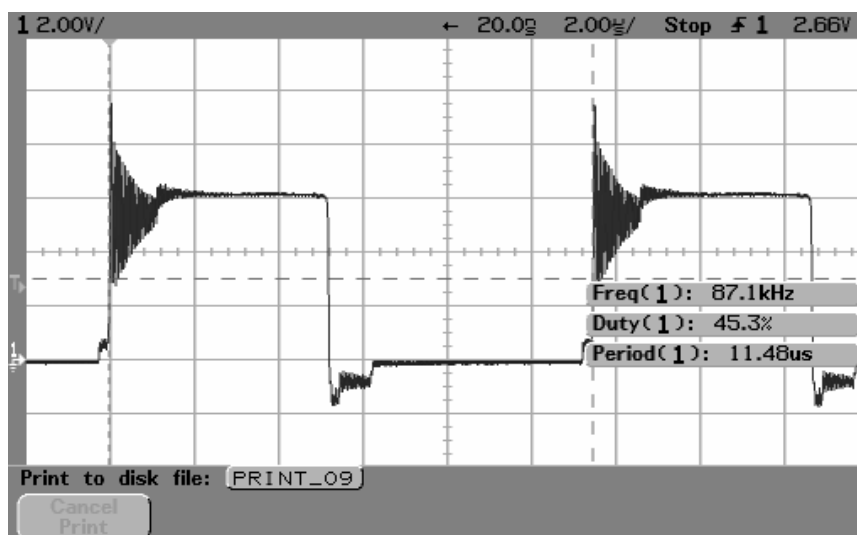
Obr. 25 Napětí u_{GE} na tranzistorech T_2 a T_{D1}

Na Obr. 26 je vidět napětí u_{CE} tranzistoru T_{D0} synchronního usměrňovače při chodu naprázdno.



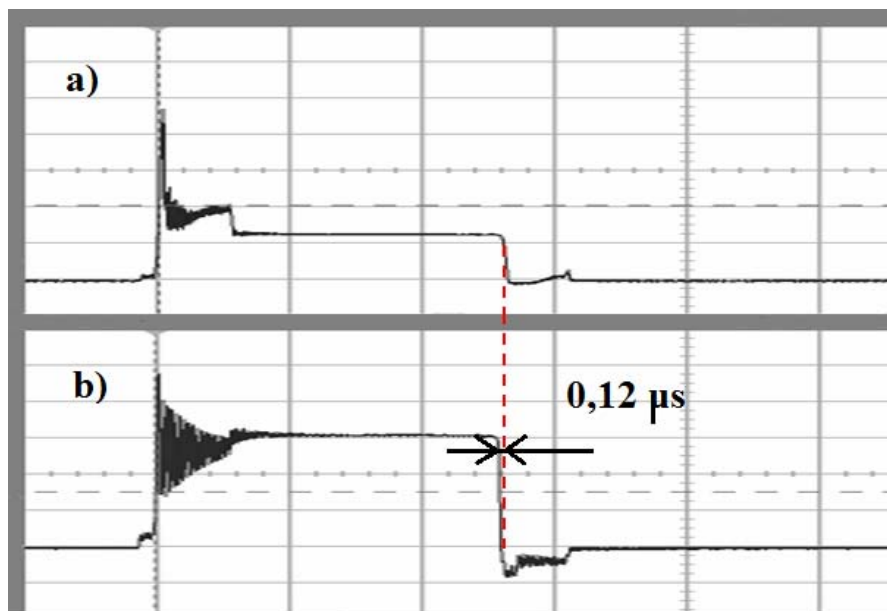
Obr. 26 Napětí u_{CE} na tranzistorech T_{D0}

Na Obr. 27 je pak průběh téhož napětí při chodu s plným zatěžovacím proudem. Je patrný vznik parazitních úbytků napětí v době obou odskoků, kdy proud přejímají pouze substrátové diody (pasivní usměrňovač). To zvyšuje ztráty synchronního usměrňovače. Takto vzniklé přídavné ztráty bohužel není možné odstranit, protože existence odskoků je v tomto zapojení nezbytná.



Obr. 27 Napětí u_{CE} (u_X) na tranzistorech T_{D0} při zatížení 450A

Na Obr. 28 jsou zobrazeny výřezy z Obr. 26 a Obr. 27 ukazující průběhy napětí na tranzistoru T_{D0} . Červenou čarou je znázorněn postup odečtení délky časového úseku důležitého pro výpočet rozptylové indukčnosti transformátoru.



Obr. 28 Porovnání detailů výstupního napětí u_{CE} a) naprázdno, b) se zátěží

Určení rozptylové indukčnosti transformátoru:

Časový rozdíl určený pomocí Obr. 28

$$\Delta t = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ s} \quad (9.1)$$

Lze psát vztah pro rozptylovou indukčnost:

$$L_{R2} = \frac{U_{2\max} \cdot \Delta t}{I_{2\max}} = \frac{6 \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}}{450} = 1,6 \text{ nH} \quad (9.2)$$

Výpočet potvrdil předpoklady z návrhu transformátoru. $L = 1,6 \text{ nH}$ je velmi malá hodnota, která ovlivní výslednou velikost výstupního napětí jen zanedbatelně. V případě kdy by byla indukčnost větší, byl by takový transformátor pro naše potřeby nepoužitelný, protože by velmi klesla výsledná hodnota výstupního napětí při velkém zatěžovacím proudu.

10 ZÁVĚR

Páječka byla navržena, vyrobena a oživena. Byla zpracována kompletní dokumentace popisující výpočty parametrů polovodičových součástek a impulzního transformátoru. Následně byla provedena kontrolní měření a nastavení a byla ověřena praktická použitelnost zařízení (skutečné pájení).

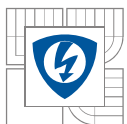
Při zkušebním provozu a kontrolním měření byly zjištěny následující skutečnosti: pájecí očko musí mít dostatečnou tepelnou vodivost (velký průřez, malou délku) aby se teplo dobře odvádělo do pájeného spoje. Zároveň však musí očko mít dostatečně velký odpor, aby při maximálním proudu I_{max} vzniknul dostatečný výkon P . Proto se při praktických pokusech ukázalo nevhodné použití měděného očka navrženého v kap. 3.2, ale bylo použito očko mosazné (s větší rezistivitou, tj. tlustý drát s malou délkou aniž by odpor byl příliš malý - účelná koncentrace výkonu do malého objemu očka). Měděná očka slabších průřezů se neosvědčila, na plný výstupní výkon se rozžhavlala do červena a v mžiku přepálila.

Maximální výkon páječky byl zjištěn při kontrolním měření. Při maximálním výstupním proudu $I = 450\text{A}$ bylo dosaženo maximálního výstupního napětí $U = 2\text{V}$. Tomu tedy odpovídá výkon 900W na svorkách pájecí stanice. Měnič však díky poněkud menšímu odporu použitého očka nepracoval při tomto měření se zcela plnou střídou, maximální dosažitelný výkon bude proto ještě poněkud vyšší a bude se blížit předpokládaným vypočtené hodnotě 1070W .

Výkon páječky lze plynule nastavovat potenciometrem pomocí proudové smyčky - tato vlastnost zvyšuje univerzálnost a rozšiřuje okruh využití páječky - lze s ní pájet od SMD po okapy.



Obr. 29 Hotový prototyp



LITERATURA

- [1] UTTENDORFSKÝ, Aleš. *Transformátorová páječka 500W*. Brno, 200?. 30 s. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [2] ŠELEPA, Jan. *Transformátorová páječka 500W*. Brno, 2009. 28 s. Semestrální práce 1. VUT Brno.
- [3] ŠELEPA, Jan. *Transformátorová páječka 500W*. Brno, 2009. 35 s. Semestrální práce 2. VUT Brno.
- [4] VOREL, Pavel; PROCHÁZKA, Petr. *Řídicí členy v elektrických pohonech*. Brno: FEKT, 2009. 101 s.
- [5] *Semic Trade s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2010-05-02]. Pasiva - toroidní jádra. Dostupné z WWW: <http://www.semic.cz/pasiva/B05_12.pdf>.
- [6] *Alldatasheet.com* [online]. 1998 [cit. 2009-11-08]. UC3845 - Current Mode PWM Controller, Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/29384/TI/UC3845.html>>
- [7] *Alldatasheet.com* [online]. 2003 [cit. 2010-05-02]. IRF2804. Dostupné z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/92816/IRF/IRF2804.html>>.
- [8] *Alldatasheet.com* [online]. 2002 [cit. 2010-05-02]. FDH44N50. Dostupné z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/51369/FAIRCHILD/FDH44N50.html>>.